6. RÉSZ Megszilárdult beton témaköre 6. RÉSZ

Sejtszerkezet, sejtbeton fogalma *(2002. június)*

Sugárvédő beton, sugárvédő nehézbeton *(2024. február)*

Szálerősítésű betonok vizsgálata és tulajdonságai *(1999. június)*

Száz év tervezési élettartamú beton *(2023. december)*

SZIKKTI Betonosztály (beleértve: ÉaKKI, SZIKKI, BETONOLITH) tevékenysége, 1953-1996 *(Frissítve: 2009. augusztus)* **Lásd: SZIKKTI.**

Ujhelyi János és **Popovics Sándor** kutatási eredményei *(2010. március)* **Lásd: PÁLYATÁRSAK-írásai.**

Újrahasznosított adalékanyagú beton. Beton- és Vasbetonépítési Műszaki Irányelv. *fib* Magyar tagozata. *(2005. október)* **Lásd: *fib* BV-MI 01:2005 (H)**

Ultra nagy szilárdságú beton *(2009. november)*

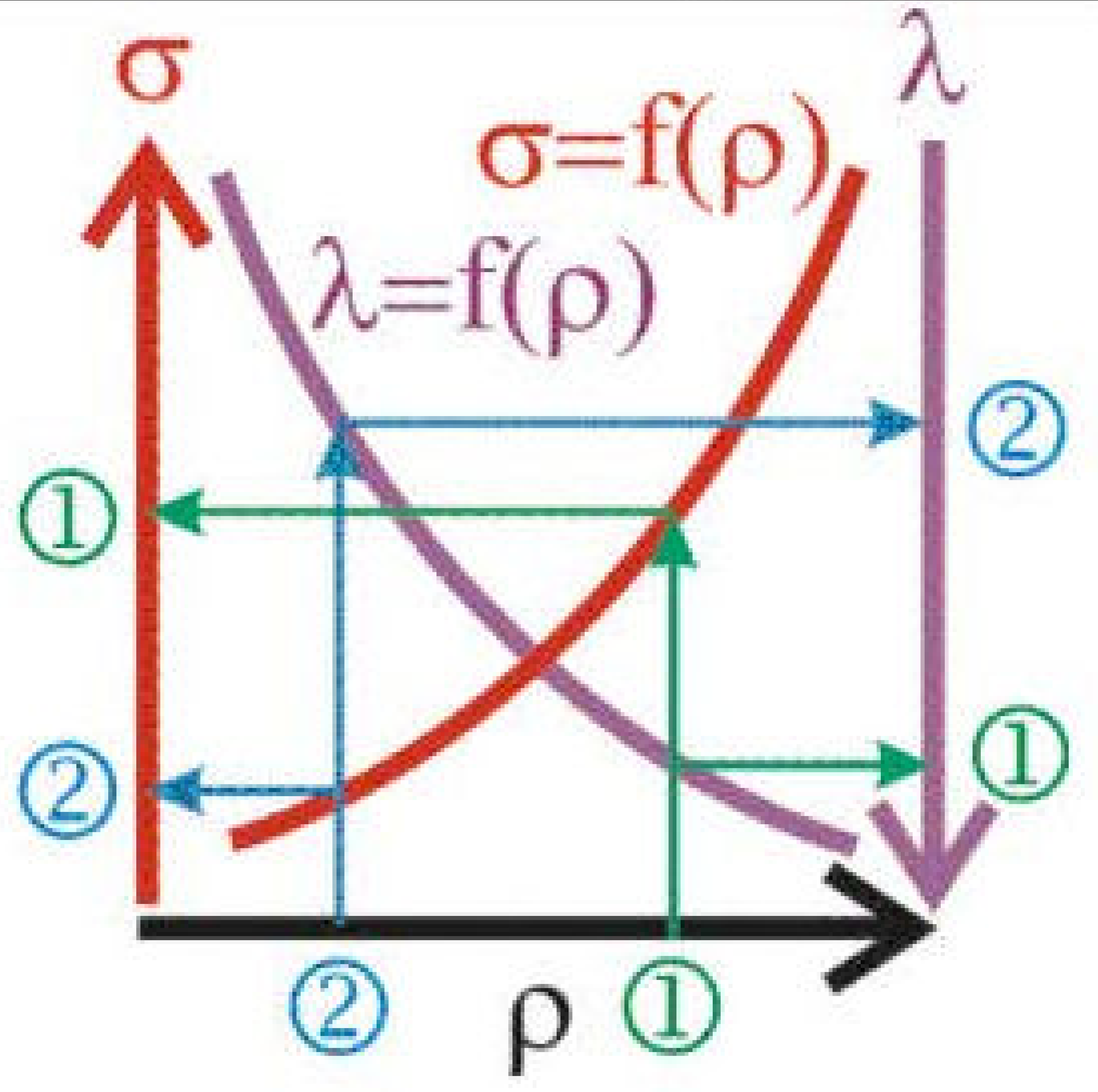
Vékonybeton szőnyegezés aszfaltpályára (White Topping). **Erdélyi Attila** szakirodalmi gyűjtése *(2023. szeptember)* **Lásd: PÁLYATÁRSAK-írásai.**

Vízzáró betonok *(2007. december)*

Vízzáró beton és vizsgálata. Cikk a Vasbetonépítés. c. folyóiratban. Szerzők: **Balázs** L. György és **Kausay** Tibor *(2010. szeptember)*

Zúzottkavics adalékanyagú betonok szilárdsága. Építőanyag. 1986. 11. szám. pp. 344-352. *(2009. október)*

YTONG Gázbeton-Pórusbeton. **Dieter Hums** 1987. és 1990. években, az Építőanyag folyóiratban megjelent két cikke: "YTONG gázbeton előállítása, tulajdonságai és alkalmazása" és "Homokalapú gázbetonok szilárdsági, hőtechnikai, akusztikai, építésbiológiai tulajdonságai" *(2010. december)* **Lásd: PÁLYATÁRSAK-írásai.**

	<u>Sejtszerkezet, sejtbeton</u>	
Németül:	Porenbeton (sejtbeton), Gasbeton (gázbeton), Schaumbeton (habbeton)	 A testsűrűség hatása a nyomószilárdságra és a hővezetési tényezőre
Angolul:	Cellular concrete (sejtbeton), Gas concrete (gázbeton), Foam-concrete (habbeton)	
Franciául:	Béton cellulaire (sejtbeton), Béton-gaz (gázbeton), Béton mousse (habbeton)	

A pórus ◆, a légbuborék ◆, a sejt, a hézag, az üreg a szilárd testben ◆ vagy a szilárd testek halmazában lévő, *szilárd anyaggal ◆ ki nem töltött, tömeg nélküli, különböző terek* elnevezései. E tömeg nélküli terekben gázállapotú anyag (többnyire levegő) vagy elgőzölhető víz ◆, folyadék található.

A **sejtszerkezet** tudatosan létrehozott sejtek (de nem légbuborékok ◆) rendszere, amely a (cementes) mészhabarcsból vagy cementpépből előállított **sejtbeton** sajátja. A sejtbeton finom adalékanyaggal (esetleg csak cementből) készülő *könnyűbeton* ◆. A sejtbetonok előállítása lényegében a mészhomoktégla ◆ gyártás technológiájából fejlődött ki úgy, hogy a mészhomoktégla viszonylag tömör szerkezetét különböző sejtképző anyagok és módszerek alkalmazásával sejtesítették.

Legfeljebb 2 mm átmérőjű, zárt sejtekből álló sejtszerkezetet állítható elő:

- <u>gázképzővel</u>, amely esetben a sejtbetont **gázbetonnak** ◆ nevezzük. A régebbi nevezéktan (XX. század első kétharmada) szerint a gázbeton a gázképzővel és cement kötőanyaggal készített sejtbetont, a gázszilikát a gázképzővel és mész kötőanyaggal készített sejtbetont jelentette. Gázképzőként régebben például hidrogén-peroxidot (H_2O_2) használtak, amely klórmésszel ($CaCl_2O$) összekeverve oxigéngázt (O_2) fejleszt, vagy kalcium-karbidot (CaC_2) alkalmaztak, amelyből víz hatására acetiléngáz (C_2H_2) keletkezik. A legelterjedtebb, ma is használatos gázképző az alumíniumpor vagy -paszta, amely a mészhidrát ($Ca(OH)_2$) vizes oldatából hidrogéngázt fejleszt a friss, cementes mészhabarcsban, amely őrölt égetett mészből, őrölt gipszkőből, cementből, pernyéből vagy őrölt kvarchomokból, és vízből áll. A sejtesített, előérlelt gázbetont autoklávolással ◆ szilárdítják, szilárdságát a kémiai folyamat hatására kialakuló kalcium-hidro-szilikátok adják. Ma a gázbeton-termékeket üzletpolitikai meggondolásból mind a kereskedelemben, mind a szabványosításban *pórusbetonnak* ◆ nevezik.

- <u>habképzővel</u>, amellyel nyert sejtbetont **habbetonnak** ◆ nevezzük. A régebbi nevezéktanban a habbeton a habképzővel és cement kötőanyaggal készített sejtbetont, a habszilikát a habképzővel és mész kötőanyaggal készített sejtbetont jelentette. A legelterjedtebb habképzők az enyvgyantás, a gyantás szaponinos, az alumoszulfonát, a hidralizált vér, a hidralizált keratin habképzők, és újabban más, szintetikus anyagok. A habbetonok kötőanyaga cement, adalékanyaga homok. A habképzőt vagy az előre felvert habot a friss habarcshoz, esetleg cementpéphez szokás gyorsjáratú kényszerkeverőgépben keverni. A habbeton transzportbetonként szállítható, szivattyúzható. A habbetonokból általában természetes szilárdítású, monolit hőszigetelő rétegek készülnek.

Ha a sejtszerkezetet nagy mennyiségű vízzel, a felesleges víz elpárologtatásával hozzuk létre, akkor mikroporitról beszélünk. A mikroporit előállítási módján túl annyiban is különbözik a gázbetontól és a habbetontól, hogy a mikroporit sejtszerkezete szabad szemmel nem látható, és a kis méretű sejtek egymással összefüggőek. Gyártása elsősorban a mikroporit gyenge tulajdonságai és nagy zsugorodási hajlama miatt a gyakorlatban nem terjedt el.

A sejtbetonok jó hőszigetelők, hőszigetelő-képességük ◆ testsűrűségük ◆ csökkenésével javul, miközben nyomószilárdságuk ◆ csökken. A sejtbetonok testsűrűségét a sejtképzőszer adagolásával és a gyártási technológia módosításával lehet megváltoztatni. Valamely sejtbeton összetételének megválasztása a megfelelő testsűrűség (ρ), hővezetési tényező (λ) és nyomószilárdság (σ) közötti kompromisszum alapján történhet meg.
A fenti, ezt bemutató ábrán az j a rossz, a k a jó hőszigetelő-képességű sejtbeton esete.

Felhasznált irodalom:

Palotás László: Építőanyagok. II. kötet. Akadémiai Kiadó. 1961.

Palotás László - Balázs György: Mérnöki szerkezetek anyagtana. 3. kötet. Akadémiai kiadó. Budapest, 1980.

Jelmagyarázat: ◆ A jel előtt álló fogalom a fogalomtár szócikke.

Megjelent a	BETON szakmai havilap	2002. június havi számának 9. oldalán

Sugárvédő beton, sugárvédő nehézbeton

A sugárvédő beton tervezési élettartama 100 év. Az MSZ 4798:2016/4M:2023 magyar betonszabvány szerint a 100 év tervezési élettartamú műtárgyak, ún. monumentális építmények tervezése, készítése és ellenőrzése esetén a betonnyomószilárdság ~50%-os elfogadási valószínűséggel és S*tuden*t-tényezővel való értékelése, valamint a betonfedés követelménye *előírás*, azaz alkalmazása *kötelező*!

A sugárvédő beton az ionizáló sugárzás ellen hivatott védelmet nyújtani.

A betonnal gyengíthető ionizáló hatása a röntgensugaraknak, a radioaktív alfa-, béta- és gamma-sugaraknak, valamint a magreaktorokban fellépő neutronsugaraknak van. (*Balázs*, 2010)

A röntgensugárzás nagyobb része káros, és káros a sugárzást ért testek másodlagos (szekunder) sugárzása is, amelyek ellen ólomréteggel, vagy ezt helyettesítő egyéb anyagokkal (például vas, horgany, baritvakolat, beton stb.) szokás. A tapasztalatok szerint a szokványos adalékanyaggal készített, legalább 2400 kg/m^3 testsűrűségű beton 200 kV röntgencső-feszültségig, e felett a legalább 3000 kg/m^3 testsűrűségű nehézbeton 30 cm vastagságban elegendő a röntgensugárzás elleni védelemre. (*Balázs*, 2010)

Az alfa-sugarak és a béta-sugarak leárnyékolása általában mm nagyságrendű anyagvastagsággal megoldható. (*Balázs*, 2010)

A gamma-sugarak a röntgensugarakkal rokon tulajdonságúak, de energiájuk nagyobb, ezért az ellenük való védekezéshez vastagabb ólomfalra, vagy más, azt helyettesítő anyagra van szükség. A gamma-sugarak elleni védekezéshez nagy atomtömegű és nagy testsűrűségű anyagokat, például nehézbetont kell használni. (*Balázs*, 2010)

A neutronsugárzást vízréteggel lehet lassítani, de a másodlagos gamma-sugárzás miatt a neutronsugárzás elleni védelemül a nagy testsűrűségű és nagy hidrátvíz-tartalmú hidrátbetonok alkalmasak. (*Balázs*, 2010)

A sugárvédő nehéz- és hidrátbetonok fogalmairól a sugárvédő betonból tervezendő szerkezetekről, a sugárvédő betonokhoz felhasználható anyagokról, a sugárvédő betonok tervezési feltételeiről, összetételéről, készítéséről, minőségellenőrzéséről az egykori MÉASZ ME-04.19:1995 műszaki előírás 12. fejezetében lehet olvasni.

Az MÉASZ ME-04.19:1995 műszaki előírás 12. fejezete szerint:

- A *sugárvédő beton* az ionizáló sugárzások valamely fajtája ellen biológiai védelmet nyújtó betonfajta; megfelelően megválasztott összetételének a következtében elnyeli a röntgen-, a gamma- és/vagy a neutronsugarakat. A sugárvédő beton fajtái: nehézbeton, hidrátbeton és közönséges beton.
- A *nehézbeton* főleg nagy rendszámú elemekből áll; elsősorban a röntgen és a gamma sugarak ellen nyújt védelmet. Legfontosabb jellemzője a testsűrűség. Sugárvédő képessége a testsűrűség növekedésével nő.
- A *hidrátbeton* kis és nagy rendszámú elemeket egyaránt tartalmaz és a neutron sugárzás ellen nyújt védelmet. Legfontosabb jellemzője a kémiailag kötött víztartalom (hidrátvíz).
- A *nehéz adalékanyag* nagy rendszámú elemekből álló, legalább 3,5 t/m' testsűrűségű különleges adalékanyag.
- A *hidrátvíz-tartalmú adalékanyag* kémiailag kötött vizet nagyobb mennyiségben tartalmazó különleges adalékanyag
- A *bórtartalmú kiegészítőanyag* a lassú és a termikus neutronok befogására adagolt különleges anyag.

Minden beton- vagy vasbetonszerkezetet, amelyet a biológiailag káros sugárzások valamelyik fajtája elleni védelem céljára készítenek, az adott célra alkalmas sugárvédő betonból kell tervezni. A sugárvédő betonból tervezendő szerkezetek a teljesség igénye nélkül a következők:

- *Reaktorok* sugárvédő szerkezetei: stabil reaktorok, mobil reaktorok.
- *Helyiségek* sugárvédő szerkezetei: röntgen besugárzók, izotópos besugárzók, gyorsítók (lineáris és ciklotron), amelyek lehetnek kutatási célúak, ipari alkalmazásra készített vagy mezőgazdaságban alkalmazott helyiségek, továbbá életvédelmi helyiségek (óvóhelyek).
- Különleges rendeltetésű *fülkék és fülkesorok*: gamma-fülkék, bontó és átrakó fülkék, ciklotron (besugárzó) fülkék, trezorok, különleges szállító csatornák és felvonók.
- *Hulladéktárolók*: szilárd hulladéktároló bunkerek, folyadék hulladéktároló tartályok.
- *Nyílászáró és határoló* sugárvédő szerkezetek: stabil nyíláshatárolók, mobil nyílászárók.

Az MSZ 4798:2016/4M:2023 szabvány szerint a sugárvédő nehézbetonok adalékanyaga és testsűrűségi osztálya a kiszárított állapotban mért testsűrűség alapján az *1. táblázat* szerinti.

1. táblázat: A 60 ºC hőmérsékleten kiszárított szilárd nehézbeton testsűrűségi osztályai és adalékanyagai (MSZ 4798:2016/4M:2023)

<table>
<tr><td colspan="6">Nehézbetonok testsűrűségi osztályai</td></tr>
<tr><td>D2,6</td><td>D3,1</td><td>D3,6</td><td>D4,1</td><td>D4,6</td><td>D5,6</td></tr>
<tr><td colspan="6">A kiszárított állapotú szilárd nehézbeton testsűrűségének tartománya
az MSZ EN 12390-7:2019 szerint vizsgálva, egyedi érték, kg/m^3</td></tr>
<tr><td>> 2600 és
≤ 3100</td><td>> 3100 és
≤ 3600</td><td>> 3600 és
≤ 4100</td><td>> 4100 és
≤ 4600</td><td>> 4600 és
≤ 5600</td><td>> 5600 és
≤ 6600</td></tr>
<tr><td colspan="6">Megjegyzés: A megszilárdult nehézbeton testsűrűségének előírása a tervező,
a nehézbeton összetételének megtervezése a betontechnológus feladata.</td></tr>
<tr><td colspan="6">Ajánlott nehéz adalékanyag (és testsűrűsége, kg/dm^3), például</td></tr>
<tr><td colspan="2">Barit (4,0-4,3),
Ilmenit (4,55-4,65),
Magnetit (4,65-4,8),
Hematit (4,7-4,9)</td><td colspan="2">Magnetit (4,65-4,8),
Hematit (4,7-4,9),
Ferroszilícium (5,8-6,2),
Ferrofoszfor (6,0-6,2),
Fe-granulátum ≤ 8 mm
(6,8-7,5)</td><td colspan="2">Fe-granulátum ≤ 8 mm
(6,8-7,5),
Fe-homok 0,2-3,0 mm
(7,5-7,6)</td></tr>
<tr><td colspan="6">A nehézbeton legalább 3000 kg/m^3 testsűrűségű nehéz adalékanyaggal készül.</td></tr>
</table>

A sugárvédő betonok tervezésével például a tíz szabványból álló német DIN 25420 „Errichtung von Heißen Zellen aus Beton" szabványsorozat foglalkozik. A DIN 25413-1:2013 és DIN 25413-2:2013 szabvány szerint a sugárvédő nehézbeton testsűrűsége kiszárított állapotban legalább 2800 kg/m^3, bár sugárvédő beton 2600 kg/m^3-nél kisebb testsűrűségű betonból is készíthető. A sugárvédő nehézbeton nyomószilárdsági osztálya általában C20/25, C25/30 és C30/37 (*Zement-Merkblatt* B 10), illetve HC20/25, HC25/30 és HC30/37, ahol a HC nem szabványos betűjel a nehézbeton jelölésére.

A *DBV Merkblatt Strahlenschutzbeton* (1996) műszaki útmutatóban írják, hogy a sugárvédő betonok mindig a B II csoportba tartozó betonok (biztonsággal az Eurocode 2 szabvány szerinti mai legalább C25/30 nyomószilárdsági osztályú betonok, lásd *könyvünk 8.3. fejezetét*); ezeknek a betonoknak a sugárzás csillapítása speciális tulajdonságnak számít. Ezekre a betonokra speciális követelmények vonatkoznak a gyártás, a feldolgozás és a felügyelet tekintetében.

A nehéz adalékanyagokkal előállított sugárvédelmi betonok testsűrűsége általában > 2,80 kg/dm^3, de a szokványos (normál) betonokat is előnyösen használják sugárvédelemre, például a reaktorépítésben. A nehéz adalékanyagokkal készített betonok terhelő- (ballaszt-) és hangszigetelő betonként is használhatók.

A sugárcsillapításhoz szükséges betontervezési adatokat, mint a testsűrűséget, a kötött víztartalmat és a kémiai összetételt, a beton összetevőinek kiválasztásához és a beton összetételének megtervezéséhez meg kell adni a sugárvédő beton betontechnológusa számára.

Elvileg minden MSZ EN 197-1:2011 szerinti cement alkalmas sugárvédő beton készítéséhez, mégis előnyben kell részesíti azokat a cementeket, amelyek pozitív hatással vannak a sugárvédő szerkezetek repedésmentességére és a friss beton bedolgozhatóságára.

A sugárvédő beton adalékanyaga természetes nehéz adalékanyag (barit, magnetit, hematit, ilmenit), mesterséges nehéz adalékanyag (nehéz salak, ferrofoszfor, ferroszilícium, vasdara, acélhomok), kristályvíz tartalmú adalékanyag (limonit, szerpentin) vagy bórtartalmú (kolemanit, bórfritt, bórkalcit, bórpor, bórkarbid) adalékanyag lehet. A sugárvédő beton adalékanyagainak testsűrűsége – a szerpentin és a bórtartalmú adalékanyagok kivételével – legalább 3000 kg/m^3, nyomószilárdsága általában legalább 80 N/mm^2; szemmegoszlási görbéje kövesse a *Fuller*-görbét (*Fuller*-parabolát), amelynek ordináta-értékeit az adalékanyagok eltérő testsűrűsége miatt mindig térfogatszázalékban kell kifejezni.

A természetes eredetű nehéz adalékanyaggal készített beton adott konzisztenciához szükséges víztartalma általában nem tér el jelentősen az ugyanolyan konzisztenciájú normál adalékanyagú beton szükséges víztartalmától. A mesterséges vastartalmú adalékanyagok általában akkor is csökkentik a vízigényt, ha a finomszemek (0/2 mm) aránya nem túl nagy. Ezzel szemben a bórtartalmú adalékanyagok növelik a vízigényt.

A betontervezés során az adalékanyagok felületi nedvességtartalmát mindig figyelembe kell venni. Annak ellenére, hogy a normál és nehéz adalékanyagok térfogatszázalékban kifejezett felületi nedvességtartalma azonos, a nehéz adalékanyag tömegszázalékban kifejezett felületi nedvességtartalma - a nehéz adalékanyag nagyobb testsűrűsége miatt – kisebb, mint a normál adalékanyag tömegszázalékban kifejezett felületi nedvességtartalma. Ezért az adalékanyag teljes felületi nedvességtartalmát az adalékanyag frakciók felületi nedvességtartalmának összegeként kell kiszámítani.

Különböző testsűrűségű adalékanyagokból készült nehézbeton könnyen szétosztályozódik, ha a konzisztenciája túl lágy és/vagy a habarcs mennyisége túl nagy.

Mivel az adalékszerek és a nehéz adalékanyagok közötti reakciók nem zárhatók ki, ezért kiterjesztett alkalmassági vizsgálatokat kell végezni (az adalékszer nélküli és az adalékszeres beton kötésének és szilárdulásának összehasonlító ellenőrzése). Az eddigi tapasztalatok szerint a folyósító adalékszerek és a kötéskésleltető adalékszerek a természetes nehéz adalékanyagokkal készített betonok tulajdonságait nem károsítja.

A betonnak a neutronsugárzás ellen védő kristályvíz-tartalma az adalékanyag kristályvíz-tartalmából és a cementkőben megkötött vízből (w_{zemgeb}) tevődik össze.

„Normál" éghajlati viszonyok között a limonit adalékanyag kristályvíz-tartalma 10-12 tömeg%, a szerpentin adalékanyag kristályvíz-tartalma 11-13 tömeg%. Az adalékanyag kristályvíz-tartalma izzítással határozható meg.

A limonittal készült sugárvédő betonok mintegy 150 °C üzemi hőmérsékletig és a szerpentin felhasználásával készült sugárvédő betonok mintegy 350 °C üzemi hőmérsékletig kellően nagy kristályvíz-tartalommal rendelkeznek. A szerpentin általában előnyösebben viselkedik, mint a limonit. A nehéz adalékanyagok kémiai hatásokkal szembeni ellenállását meg vizsgálni.

A teljesen hidratált száraz cementkőben kémiailag és fizikailag kötött víztartalom hozzávetőleges fajlagos mennyisége a mindennapi (normál) környezetben („Wohnklima") lévő betonban a

$$w_{zemgeb} = 0{,}2 \times z + 30 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

képlettel számítható ki, ahol z = a beton cement-tartalma és 30 a fizikailag kötött nedvesség mennyisége, mind a kettő kg/m^3 mértékegységben.

A z cement-tartalom szorzója, ha a víz-cement tényező 0,5 vagy annál kisebb ($x \leq 0{,}5$), akkor:

- kiszáradástól védett betonelem vagy tömegbeton esetén 3 hónapos korban: 0,19-0,21;
- CEM I portlandcement esetén szokásos (normál) tárolás mellett, 28 napos korban: 0,16-0,18;
- CEM III kohósalakcement esetén szokásos (normál) tárolás mellett, 28 napos korban: 0,14-0,16.

Ha pedig a víz-cement tényező nagyobb, mint 0,5 ($x > 0{,}5$), akkor:

- kiszáradástól védett betonelem vagy tömegbeton esetén 3 hónapos korban: 0,21-0,0,23;
- CEM I portlandcement esetén szokásos (normál) tárolás mellett, 28 napos korban: 0,17-0,19;
- CEM III kohósalakcement esetén szokásos (normál) tárolás mellett, 28 napos korban: 0,15-0,17.

Teljesen hidratált állapotban az általános felhasználású cementek (MSZ EN 197-1:2011) keverővíznek a cement tömegére vonatkoztatott körülbelül 20%-át kötik meg. Bár az aluminátban gazdag cementek (timföldcement) kémiai vízmegkötő képessége valamivel nagyobb, ez az előny nem használható fel a reaktorszerkezet tömegbeton elemeinél, mert az alumínium-oxid-cement gyors kötése során nagy mennyiségű hidratációs hő szabadul fel (*Walz* et al., 1962).

A megfelelően nagy testsűrűségű ($\rho_{szilárd\ beton}$) szilárd sugárvédő beton friss állapotban beállítandó testsűrűségét ($\rho_{friss\ beton}$) a következő képlettel becsülhetjük meg:

$$\rho_{friss\ beton} = \rho_{szilárd\ beton} + t \times s + w_V \text{ [kg/m}^3\text{]}, \text{ ahol:}$$

t = a *Student*-tényező;

s = a szilárd beton testsűrűségének szórása, amelynek közelítő értéke $s \approx 0{,}01 \times \rho_{szilárd\ beton}$ kg/m^3;

w_V = a vízveszteség kg/m^3 mértékegységben.

A sugárvédő betonok nyomószilárdsági osztálya általában: C20/25 – C25/30.

A nehézbeton zsaluzatát és állványzatát a friss beton tervezett, szokásosnál nagyobb testsűrűségére kell méretezni.

A védőhüvelyekben lévő horgonyrudak (Ankerstäbe) alkalmazása hátrányos, mert a horgonyrudak eltávolítása után meglévő nyílásokat nehéz habarccsal megbízhatóan lezárni. Ezért a betonban bennmaradó horgonyrudakat és/vagy távtartókat célszerű használni. *(DBV Merkblatt Strahlenschutzbeton*, 1996)

A különböző cementekből és adalékanyagként különböző kőanyagokból készült betonok eltérő sugárzásállóságot mutatnak. A beton térfogata a radioaktív sugárzás okozta kristályrács-zavarok hatására meredeken növekedhet. A beton sugárzásállóságát alapvetően az adalékanyag sugárzási ellenállása határozza meg, ezért adalékanyagként különösen sugárzásálló adalékanyagot kell alkalmazni. (*Grübl* et al., 2001)

Az atomreaktorok nyomástartó edényeiben a betont érő sugárterhelés a reaktor belsejétől kb. 45 cm távolságig olyan szintre emelkedhet, hogy a beton szilárdságának és merevségének csökkenésével kell számolni. A München II kutatóreaktor (FRM II) építése során a körülvevő falak, medencék és födémek nehézbetonból készültek minden olyan területen, ahol radioaktív

sugárzásra számítottak. A várható kibocsátás intenzitásától függően három különböző térfogatsűrűségű betont használtak. Az egyik betonfajta testsűrűsége 3500 kg/m^3 volt. Ehhez hematit adalékanyagot használtak. A 4500 kg/m^3 testsűrűségű betonhoz a hematiton kívül acélgranulátumot is kevertek. A 6000 kg/m^3 testsűrűségű betonokba acélgolyókat vibráltak, majd a hézagokba cementpépet injektáltak. A nagy szegregációs (szétosztályozódási) hajlam miatt földnedves betonokat (steife Betone) alkalmaztak. (*Grübl* et al., 2001)

Springenschmid (2007) szerint a jelentősen eltérő sűrűségű anyagokból álló sugárvédő friss betonok nagyon hajlamosak a szedimentációra (ülepedésre), ezért azokat földnedves konzisztenciával kell keverni. A nagy testsűrűségű finom és durva adalékanyagokkal készített betonok szivattyúzhatók. A beton készítése során figyelembe veendő a keverőüzemekkel szemben támasztott magas követelmény, a mixerek megszokottnál lényegesen kisebb töltési mennyisége, a teherhordó szerkezeti elemek szilárdsági és alakváltozási jellemzőinek kedvezőtlen változása nagyobb hőmérsékleten és nagyon erős sugárzás hatására.

Meiswinkel és szerzőtársai tanulmányában (*Meiswinkel* et al. in Beton-Kalender 2011. 1. kötet) olvasható, hogy míg az EN 206 és DIN 1045-2 szabvány szerint a száraz állapotú nehézbeton testsűrűsége nagyobb, mint 2,6 kg/dm^3, addig a DIN 25413-1:2013 és DIN 25413-2:2013 szabvány meghatározása szerint a nehéz adalékanyagokkal készített sugárvédő beton testsűrűsége száraz állapotban általában meghaladja a 2,8 kg/dm^3 értéket.

A nehézbeton építéshelyi bedolgozása a szokványos (normál) beton bedolgozásánál sokkal nehezebb. A nehéz adalékanyagok többnyire szögletes szemalakja és nagy testsűrűsége miatt a beton áramlási tulajdonságai a szokványos betonénál rosszabbak. (*Meiswinkel* et al., 2011)

Nehézbetonra, mint sugárvédelmi betonra gyakran az atomreaktorok nyomástartó edényének közvetlen közelében a biopajzs (Bioschild) részeként van szükség. Németországban a nehézbetont sugárvédelmi betonként már az 1960-as években, az első kísérleti-kutató nukleáris létesítmény építésénél használták, ahol annak idején öntöttvas-granulátummal 5,6 kg/dm^3 nehézbeton-testsűrűséget értek el. Napjainkban a nehézbeton adalékanyaga egyebek között a jobb bedolgozhatóság miatt magnetit, szerpentin, hematit vagy barit, esetenként vasgranulátum. Így például 340 kg/m^3 cementtartalommal (CEM III/B 32,5), 170 kg/m^3 víztartalommal, 1410 kg/m^3 0-6 mm szemnagyságú hematittal, 1680 kg/m^3 6-25 mm szemnagyságú hematittal és 150 kg/m^3 0-8 mm szemnagyságú homokkal 3,6 kg/dm^3 testsűrűségű nehézbeton gyártható. A 0-8 mm-es homok helyett 890 kg/m^3 0-8 mm szemnagyságú hematit, valamint 1920 kg/m^3 6-25 mm szemnagyságú hematit és 1350 kg/m^3 vasgranulátum alkalmazásával mintegy 4,5 kg/dm^3 térfogatsűrűségű nehézbetont tudunk készíteni. (*Meiswinkel* et al., 2011)

A fenn hivatkozott irodalmon kívül a sugárzással, sugárvédő betonokkal részletesebben foglalkozik például:

- *Paks II.:* „Atomenergetikai alapismertek”, (é.n.); http://www.paks2.hu/hu/Atomenergia/IsmeretetoAlap/Lapok/default.aspx;
- Országos Atomenergia Hivatal: „Új atomerőművi nukleáris környezetben lévő beton- és vasbetonszerkezetek”. N3a.29. sz- útmutató. Verzió szám: 1. 2021. november (https://www.haea.gov.hu/web/v3/oahportal.nsf/ACA1C323EB58E62DC1257BE9002CD900/$File/N3a29_végleges.pdf)
- *Dr. Kovács Károly* „Nukleáris alkalmazású vasbetonok” című tanulmánya (2019);
- az MSZ 62-3:2017 „Az ionizáló sugárzás elleni védelem. 3. rész: A neutronsugárzás elleni védelem”
- *Lohaus* et al., 2011;
- *Ardenne* et al., 2005;
- MSZ 62-1:1989 „Ionizáló sugárzás elleni védelem. Általános előírások”. Visszavont szabvány

fib
Szálerősítésű betonok
- a kutatástól az alkalmazásig -
Budapest, 1999. március 4-5.

Konferenciakiadvány

Proceedings

Szálerősítésű Betonok

– a kutatástól az alkalmazásig –

1999. március 4-5. Budapest

Fiber Reinforced Concrete

– from research to practice –

Szerkesztette:
Edited by:
Balázs L. György

A konferencia szervezője:
A Nemzetközi Betonszövetség Magyar Tagozata

The Conference is organized by:
The Hungarian Group of fib

fib

CEB - FIP

SZÁLERŐSÍTÉSŰ BETONOK SZABVÁNYOSÍTOTT VIZSGÁLATAI ÉS NÉHÁNY TULAJDONSÁGA

Dr. Kausay Tibor

A *fib* (Nemzetközi Betonszövetség) Magyar Tagozata által, "Szálerősítésű Betonok - a kutatástól az alkalmazásig" címmel Budapesten, 1999. március 4.-5. között rendezett konferencián elhangzott előadás alapján.

A *fib* Magyar Tagozata a konferencia előadásokat tartalmas kiadványban foglalta össze.

ÖSSZEFOGLALÁS

A szálerősítésű betonok alkalmazásának feltétele, hogy tulajdonságait megismerjük és vizsgálatát szabatosan, megismételhetően, összehasonlíthatóan végezzük. E törekvésünkben tájékozódni szükséges a nemzeti szabványok és műszaki előírások felől, meg kell vizsgálni közös elemeiket és különbségeiket. Ennek céljából elemeztünk 39 műszaki dokumentumot, megkíséreltük rendszerezésüket, feldolgoztuk érdekesebb intézkedéseiket, azokhoz esetenként megjegyzéseket fűztünk. A munka hátteréül a *T 007382 számú OTKA* kutatási téma szolgált (*Kausay 1994 és 1996*), amelynek zárójelentését az OTKA Építési-Építészeti-Közlekedési Zsűrije 1999. áprilisában "kiváló" minősítéssel fogadta el.

1. BEVEZETÉS

A szálerősítésű beton használatának kezdetét 1874. évre teszik, amikor is *A. Berand* fémhulladékot kevert a betonba, és ezt az eljárást szabadalmaztatta (*Nemegeer - Teutsch 1993*). A fejlődés első periódusa 1960-ig tartott, és azt a szálerősítésű beton ritka alkalmazása jellemezte. Használata a második periódus kezdetén, az 1960-as évek elején lendült fel. Hazánkban mind az alkalmazás, mind a publikálás, mind a szabvány készítés terén dr. Szabó Iván mutatott példát (*Szabó 1976*) és akadtak követői is (*Dombi 1976*). Húsz év elteltével már bízvást beszélhettünk arról, hogy a harmadik periódus ránk köszöntött. Egyre szélesebb körben végeztek kutatásokat (*Kausay 1993, 1994*) és napjainkra a szálerősítésű beton sokféle alkalmazását dolgozták ki és valósították meg.

Ez az érdeklődés arra vezethető vissza, hogy a szálerősítésű betonok a normál betonokhoz képest számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek: friss állapotukban állékonyabbak, zsugorodási repedésérzékenységük kisebb, gőzölés nélkül is korán kizsaluzhatók, hajlító-húzószilárdságuk, ütőszilárdságuk, dinamikai ellenállásuk, kopásállóságuk nagyobb, vízzáróságuk, korrózióállóságuk jobb, a hálósan vasalt betonnál könnyebben kivitelezhetők, a szálerősítésű lőttbetonok visszahullása az átlagosnál kisebb. E kedvező tulajdonságok teszik a szálerősítésű betont alkalmassá arra, hogy belőle vékony falú és egyéb monolit vagy előregyártott szerkezetek és elemek készüljenek. A szálerősítésű betont jól lehet használni repülőtéri, út- és térburkolati pályabetonok, ipari padlóburkolatok, lőttbetonok, alagutak, csatornák, bányabiztosítások, trezor építmények, ipari olajfelfogó tálcák, tömegbetonok, dinamikusan igénybe vett szerkezetek, előregyártott betonelemek készítésére, mindezek és az egyéb statikailag és korrozív módon károsodott szerkezetek, például födémek helyreállítására és megerősítésére.

A beton és a szálerősítésű beton szilárdság-alakváltozási anyagmodellje különbözik egymástól. A beton szilárdságtani és alakváltozási szempontból rugalmas-kvázi-képlékeny anyag, amelyben a rugalmas fázist az adalékanyag, a kvázi-képlékeny fázist a cementkő képviseli. Ha a betonba megfelelő minőségű és mennyiségű szálat keverünk, akkor megváltozik a cementkő törési alakváltozása, a beton megrepedése után gyakorlatilag képlékenyen viselkedik, elveszti ridegségét, szívóssá válik, alkalmazható rá az ideálisan rugalmas-képlékeny anyagmodell. A szívósság egy kifejezetten negyedik dimenziós jelenség, amelynek alapvető jelentősége van minden teherhordó szerkezetben illetve annak méretezése során. A szívósságmérés mutat rá arra, hogy a szálerősítésű beton a beton megrepedését követően is képes terhelések hordására, szívósan és képlékenyen viselkedik, szemben a szálerősítés nélküli betonnal, amely ridegen törik, és képlékeny tartománnyal nem rendelkezik. A szálerősítésű beton szívósságát legkézenfekvőbb hajlító-húzószívóssággal kifejezni, meghatározásához pedig célszerű áttekinteni a szabványokban tükröződő nemzeti felfogásokat.

2. NEMZETI SZABVÁNYOK ÉS MŰSZAKI ELŐÍRÁSOK BEMUTATÁSA

A szálerősítésű betonok számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek, hátrányuk azonban, hogy e tulajdonságok nehezen ismerhetők meg és bonyolultan vagy a megszokotthoz képest másképp vizsgálhatók. Ennek tulajdonítható a bőséges irodalom és a szabványok nagy száma. Az utóbbiakat az *1. táblázatban* tekintjük át.

1. táblázat: A feldolgozott szabványok és műszaki előírások tárgya

Szabvány vagy műszaki előírás jele	Szál anyaga	Követelmény		Keverék, próbatest össze-tétele, készítése	Betontermék gyártás, minőség-ellenőrzés	Méretezés
		termékkel szemben	betonnal és szállal szemben			
MSZ 15450/3	Acélszál	+			+	
MSZ 15450/5	Acélszál	+			+	
MI-04.117	Acélszál		+	+		+
MI-04-155	Polipropilénszál		+	+		+
NBN B 15-238	Acélszál					
NBN B 15-239	Acélszál			+		
AFNOR P 18-409	Acélszál					
S.N.C.F. Ref. 5876	Acélszál	+	+	+	+	
JSCE-SF1	Acélszál			+		
JSCE-SF2	Acélszál			+		
JSCE-SF3	Acélszál			+		
JSCE-SF4	Acélszál					
JSCE-SF5	Acélszál					
JSCE-SF6	Acélszál					
JSCE-SF7	Acélszál		+	+		
DBV-Merkblatt:1991	Acélszál					
DBV-Merkblatt:08.92.	Acélszál	+	+	+	+	

DBV-Merkblatt:09.92.	Acélszál	+	+			+
DBV-Merkblatt:Anhang	Acélszál					
Vorl. Richtlinien:1985	Üveg, fém, műanyag		+	+	+	
ÖNORM B 5073	Acélszál	+	+	+	+	+
UNE 83-500	Acél, polipropilén		+			
UNE 83-501	Acél, polipropilén		+			
UNE 83-502	Acél, polipropilén			+		
UNE 83-503	Acél, polipropilén			+		
UNE 83-504	Acél, polipropilén			+		
UNE 83-505	Acél, polipropilén			+		
UNE 83-506	Acél, polipropilén			+		
UNE 83-507	Acél, polipropilén					
UNE 83-508	Acél, polipropilén					
UNE 83-509	Acél, polipropilén					
UNE 83-510	Acél, polipropilén					
UNE 83-511	Acél, polipropilén					
UNE 83-512	Acél, polipropilén			+		
UNE 83-514	Acél, polipropilén					
ASTM A 820	Acélszál		+			
ASTM C 995	Bármely szál			+		
ASTM C 1018	Bármely szál			+		

1. táblázat folytatása: A feldolgozott szabványok és műszaki előírások tárgya

Szabvány vagy műszaki előírás jele	Szál anyaga	Termék vizsgálat	Anyag illetve próbatest vizsgálata			
			Nyomás	Hajlítás	Nyírás	Lemez átszúródása (Ütés)
MSZ 15450/3	Acélszál	+				
MSZ 15450/5	Acélszál	+				
MI-04.117	Acélszál					

MI-04-155	Polipropilénszál			+		
NBN B 15-238	Acélszál			+		
NBN B 15-239	Acélszál			+		
AFNOR P 18-409	Acélszál			+		
S.N.C.F. Ref. 5876	Acélszál					+
JSCE-SF1	Acélszál					
JSCE-SF2	Acélszál					
JSCE-SF3	Acélszál					
JSCE-SF4	Acélszál			+		
JSCE-SF5	Acélszál		+			
JSCE-SF6	Acélszál				+	
JSCE-SF7	Acélszál					
DBV-Merkblatt:1991	Acélszál			+		
DBV-Merkblatt:08.92.	Acélszál					
DBV-Merkblatt:09.92.	Acélszál			+		
DBV-Merkblatt:Anhang	Acélszál		+	+		
Vorl. Richtlinien:1985	Üveg, fém, műanyag			+		
ÖNORM B 5073	Acélszál	+				
UNE 83-500	Acél, polipropilén					
UNE 83-501	Acél, polipropilén					
UNE 83-502	Acél, polipropilén					
UNE 83-503	Acél, polipropilén					
UNE 83-504	Acél, polipropilén					
UNE 83-505	Acél, polipropilén					
UNE 83-506	Acél, polipropilén					
UNE 83-507	Acél, polipropilén		+			
UNE 83-508	Acél, polipropilén		+			
UNE 83-509	Acél, polipropilén			+		
UNE 83-510	Acél, polipropilén			+		
UNE 83-511	Acél, polipropilén				+	
UNE 83-512	Acél, polipropilén					

UNE 83-514	Acél, polipropilén					(+)
ASTM A 820	Acélszál					
ASTM C 995	Bármely szál					
ASTM C 1018	Bármely szál			+		

3. A KONZISZTENCIA JELLEMZÉSE KIFOLYÁSI MÉRTÉKKEL

Feldolgozott szabványok: UNE 83-503, ASTM C 995

A két szabvány tartalma teljesen megegyezik. Az eljárás akkor alkalmazható, ha az adalékanyag legnagyobb szemnagysága nem haladja meg a 40 mm-t és a beton nem folyós. A roskadás méréshez szabványosított, UNE 83-313 illetve ASTM C 143 szerinti Abrams-féle kúpot kisebb nyílásával lefelé egy henger alakú tartóedénybe kell befogni. A szálerősítésű betont három rétegben, tömörítés nélkül, de hézagmentesen kell a kúpba tölteni. A beton tetejére 25 ± 3 mm átmérőjű, 7000/perc rezgésszámú tűvibrátort kell helyezni. A tűvibrátort el kell indítani, hagyni kell, hogy a vibrálás hatására a kúpból kifolyó betonnal együtt süllyedjen. Kifolyási mérték az a másodpercben kifejezett idő, amely a tűvibrátor elindításától a kúp kiürüléséig eltelik.

A fordított Abrams-féle roskadásmérő kúp elrendezése a szálerősítésű betonok konzisztenciájának UNE 83-503-88 és ASTM C 995-91 szabványok szerinti méréséhez

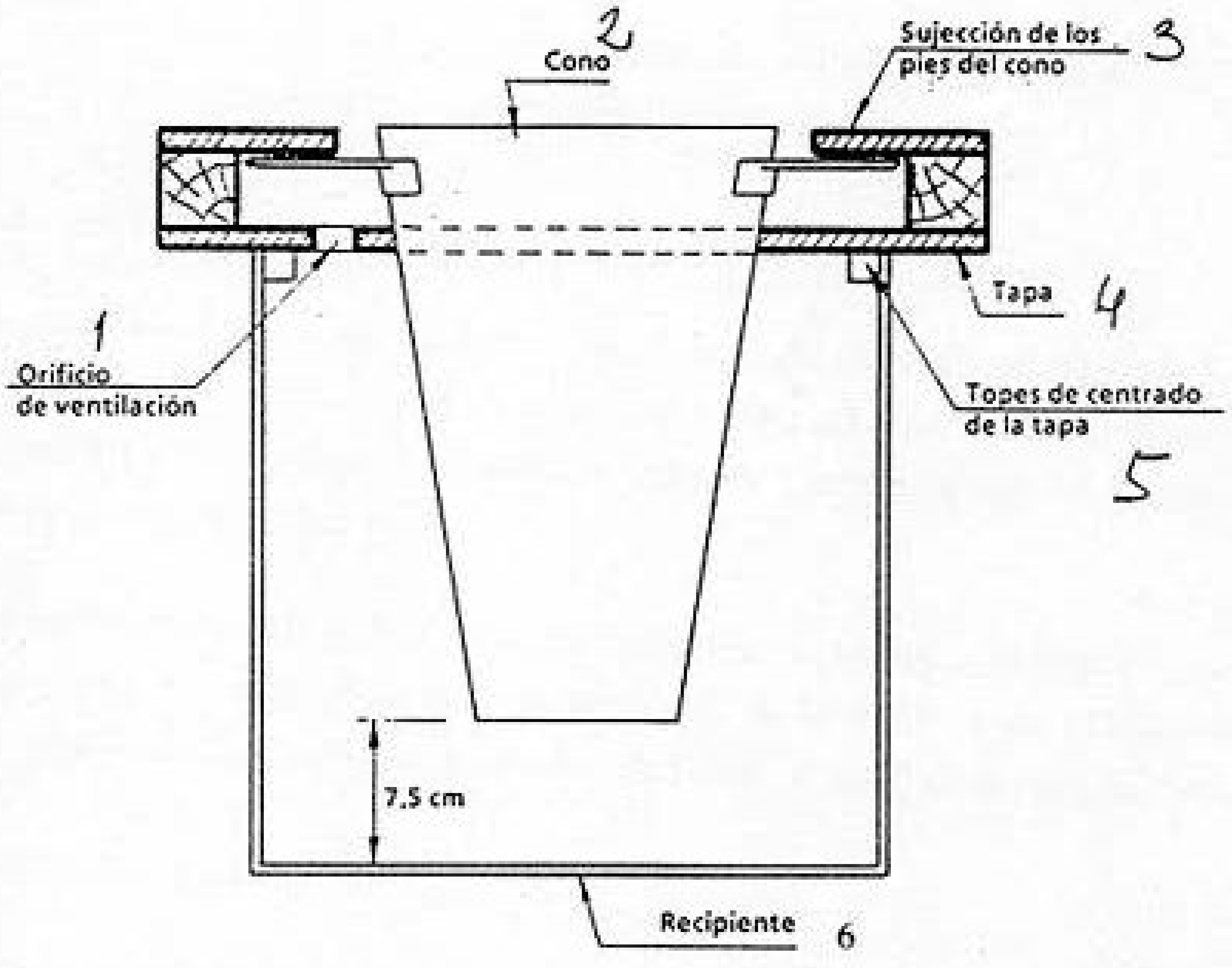


Fig. 1– Sistema de colocación del cono invertido en el recipiente

1. ábra A fordított kúp felhelyezése az edényre

1. Szellőző nyílás
2. Abrams-féle kúp
3. A kúp talpainak rögzítése
4. Középen lyukas fedél
5. A fedél központosító csapja
6. Vödör

1. ábra. Eszköz a konzisztencia méréshez

Megjegyzés: A végtelenül egyszerű eljárás bevezetésére hazánkban is szükség lenne.

Egyrészt, mert az MSZ 4714/3 szerinti konzisztencia mérési eljárások - a fent leírthoz elvileg hasonló átformálási VEBE-mérték meghatározáson kívül - nem igazán alkalmasak a szálerősítésű beton konzisztenciájának kifejezésére.

Másrészt, mert a száladagolás hatására a beton eredeti konzisztenciája megváltozik és ezt a változást fontos lenne kifejezni.

E konzisztencia változás miatt a beton MSZ 4719 szerinti megnevezésében a konzisztencia-fokozat jele szálerősítésű beton esetén nem értelmezhető.

A fenti eljárás alkalmazása különösképpen hasznosnak tűnik azon esetekben, amikor a transzportbetonba az építéshelyen, a mixer dobjában keverik be a szálat és folyósítószert is adagolva állítják be például a szivattyúzásra kerülő szálerősítésű beton konzisztenciát.

4. AZ ACÉLSZÁL TELJESÍTŐKÉPESSÉGE

Feldolgozott szabvány: NBN B 15-239

A szabvány az acélszálak típus és adagolás szerinti teljesítőképességének értékelését összehasonlító hajlítási kísérlettel végzi. Az összehasonlító kísérlet során a száladagolás nélküli referencia beton próbagerenda és a referencia betonhoz különböző adagolásokban kevert szálakkal előállított próbagerendák hajlítási tulajdonságait határozzák meg. Mérik a szálat nem tartalmazó referencia beton hajlító-húzószilárdságát (f_f) és a szálerősítésű beton NBN B 15-238 szerinti, $l/n = l/300$, és $l/n = l/150$ mm gerenda lehajláshoz tartozó hajlító-húzófeszültségét ($f_{f,300,p}$ és $f_{f,150,p}$) különböző p [kg/beton-m^3] acélszál-adagolások mellett, ahol a támaszköz általában l= 450 mm. Az acélszál teljesítőképességét a $T_{n,p}$ szívóssági tényezővel és a $p_{e,n}$ szívóssági egyenértékkel fejezik ki:

$$T_{n,p} = \frac{f_{f,n,p}}{f_f}$$

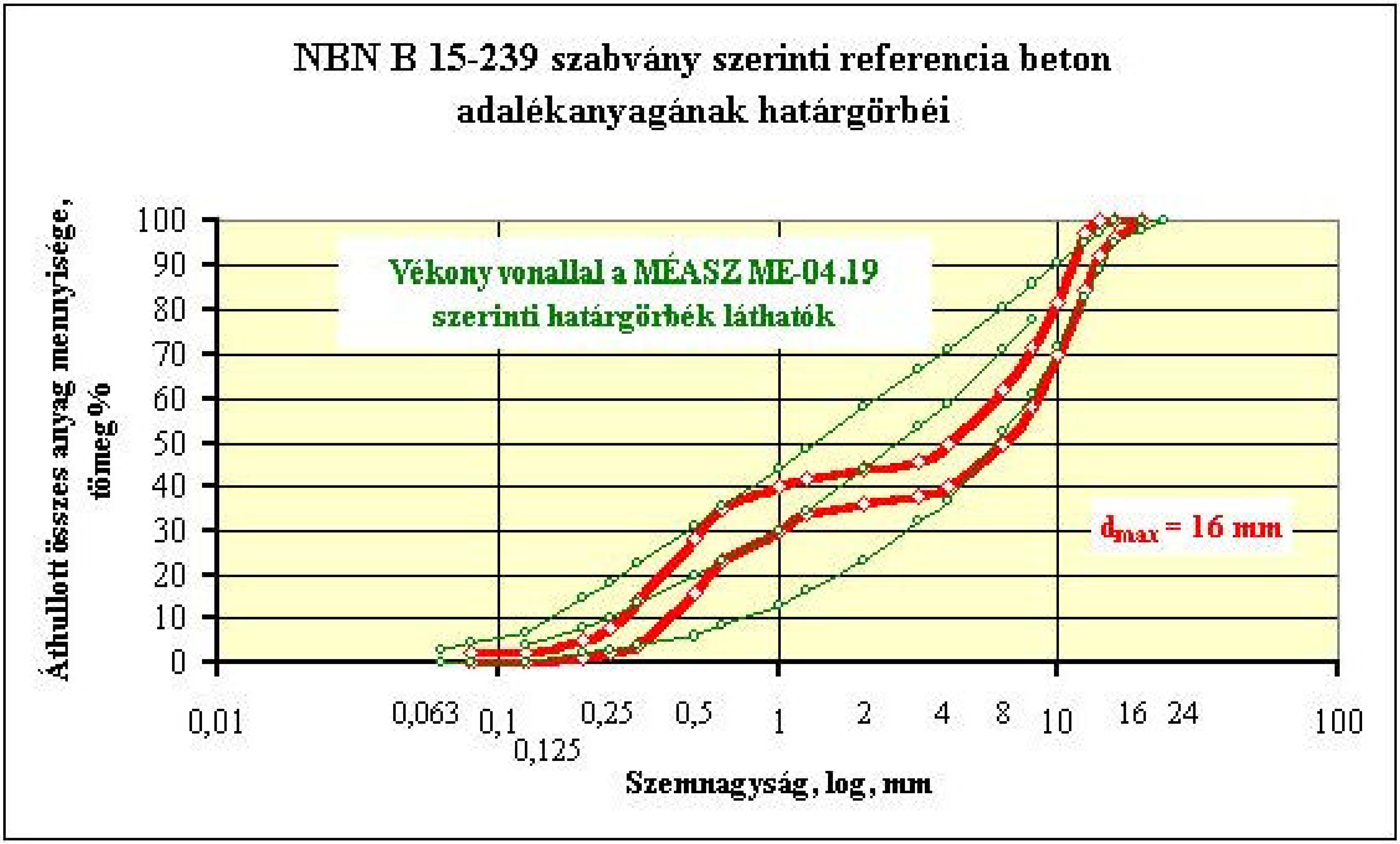
ahol: n = 300 és n = 150

A meghatározás szerint a $p_{e,n}$ szívóssági egyenérték az az 1 m^3 bedolgozott betonban lévő acélszál tömeg kg-ban kifejezve, amely a $T_{n,p}$ = 0,5 szívóssági tényezőhöz tartozik. Számítása legalább három p száladagolás esetén lineáris interpolálással történik. A száltartalmak közötti különbség 10 - 20 kg/beton-m^3.

5. AZ ÖSSZEHASONLÍTÓ KÍSÉRLETEK REFERENCIA BETONJA

Feldolgozott szabvány: NBN B 15-239

A szabvány az acélszálak teljesítőképességének értékeléséhez szabályozza a referencia beton összetételét. A cement minősége 40 nyomószilárdsági osztályú pc vagy kspc, adagolása 350 kg/m^3. A referencia beton konzisztenciája folyós, roskadási mértéke 100-150 mm. A változatlan vízadagolás miatt a szálerősítésű betont nagyobb tömörítési munkával kell bedolgozni, mint a száladagolás nélküli referencia betont. Az adalékanyag szemmegoszlásának határgörbéit a *2. ábrán* mutatjuk be. Csekély átfedéstől eltekintve a 4 mm alatti szemek homokból, a 4 mm feletti szemek kemény zúzottkőből állnak.



2. ábra. Az NBN B 15-239 szerinti referencia beton adalékanyagának határgörbéi

<u>**Megjegyzés:**</u> Az adalékanyag fajtája és szemmegoszlása is különleges.

A durva zúzottkő frakció alkalmazása az útépítőipari betontechnológusok számára megszokott gyakorlat, de a magas- és mélyépítőiparban viszonylag bőséges bányakavics készleteink és a kavicsbeton könnyebb bedolgozhatósága folytán csak ritkán, kényszerítő körülmények hatására - mégis szép építési és gyártási példákat eredményezve (például dorogi hulladékégető fogadó bunkerje, tengizi csúszózsaluzatos kémények, BVM villamosvasúti lemezaljak, Rocla pörgetett-hengerelt csövek, stb.) - szokásos.

A szemmegoszlás közel lépcsős. Az 1 mm és 4 mm közötti szemek mennyisége csak mintegy 10 tömeg%, de nagyon kevés szemet tartalmaz 0,25 mm alatt és 14 mm felett is. A grafikus megjelenítés mellett a MSZ 18288/5-81 szerinti szemmegoszlás jellemzők is jól tükrözik - és az egyébként hatályos határgörbékkel is összevethetővé teszik - a referencia beton adalékanyaga szemmegoszlásának tulajdonságait (*2. táblázat*).

2. táblázat: Az NBN B 15-239 szerinti referencia adalékanyag és a MÉASZ ME-04.19 szerinti adalékanyag határgörbék szemmegoszlás jellemzőinek összehasonlítása

Szemmegoszlás jellemző	NBN B 15-239 szerinti		MÉASZ ME-04.19 szerinti		
	alsó	felső	"A"	"B"	"C"
	határgörbe, d_{max} = 16 mm				
Finomsági modulus	6,22	5,56	6,62	5,56	4,82
Logaritmikus $d_{átl}$, mm	3,32	2,10	4,38	2,10	1,26
D_{10}, mm	0,397	0,270	0,743	0,250	0,151
D_{25}, mm	0,719	0,453	2,208	0,707	0,363
Medián, D_{50}, mm	6,300	4,000	5,824	2,639	1,346
D_{60}, mm	8,303	5,840	7,773	4,148	2,225
D_{70}, mm	10,000	7,627	9,610	5,976	3,792
D_{75}, mm	10,772	8,554	10,641	7,170	4,812
U_{60} egyenlőtlenség	20,914	21,629	10,462	16,592	14,735
U_{70} egyenlőtlenség	25,189	28,248	12,934	23,904	25,113
DQ osztályozottság	3,871	4,345	2,195	3,185	3,641
SK asszimetria érték	0,442	0,492	0,832	0,853	0,982
$d < 0,25$ mm, tömeg%	2,0	8,0	3,0	10,0	18,0

6. NYOMÓVIZSGÁLAT

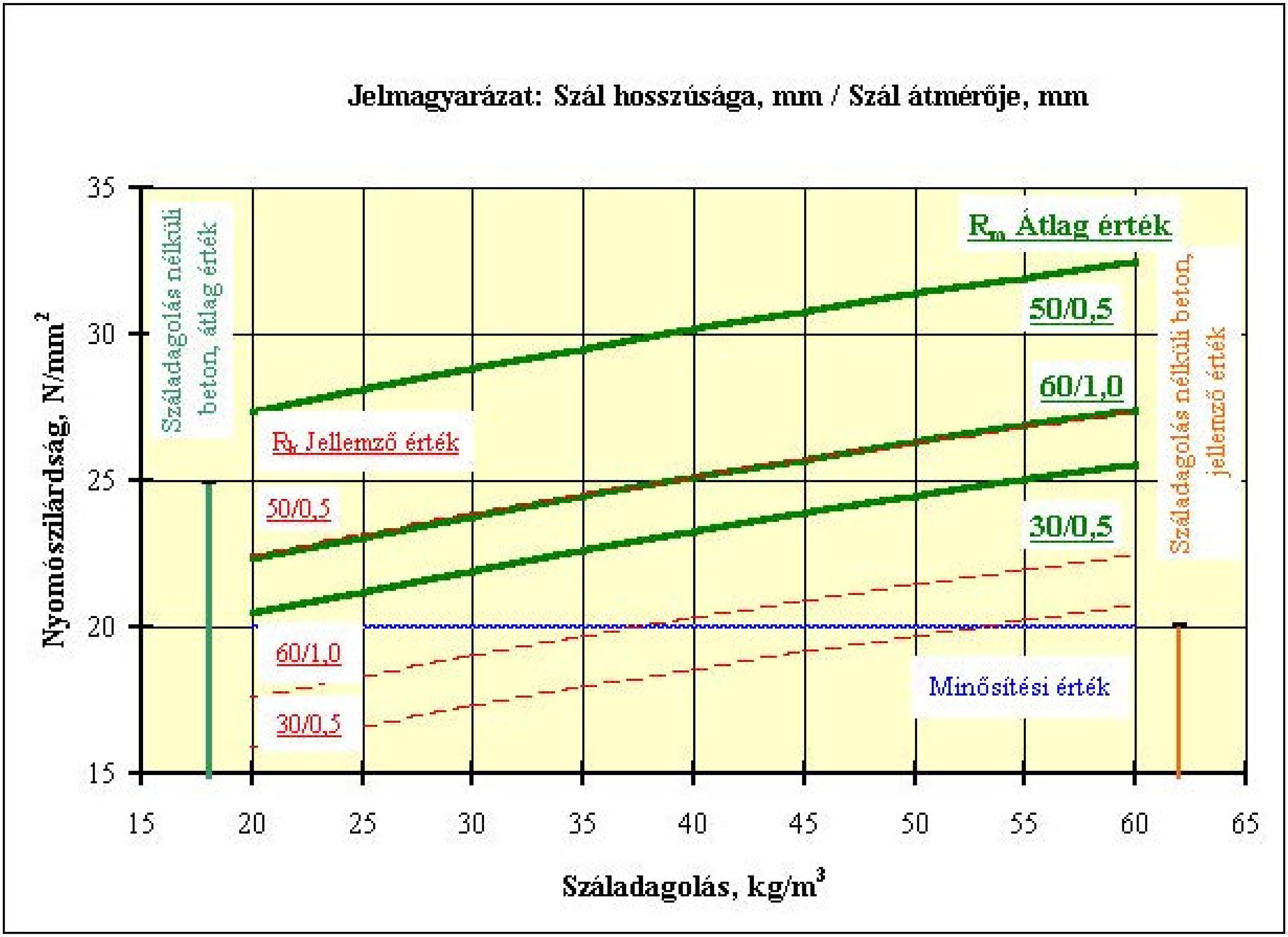
Feldolgozott szabványok és műszaki előírások: JSCE-SF2, JSCE-SF5, DBV-Merkblatt Anhang A, UNE 83-504, UNE 83-505, UNE 83-506, UNE 83-507, UNE 83-508.

3. táblázat: A nyomószilárdság vizsgálatok rendje

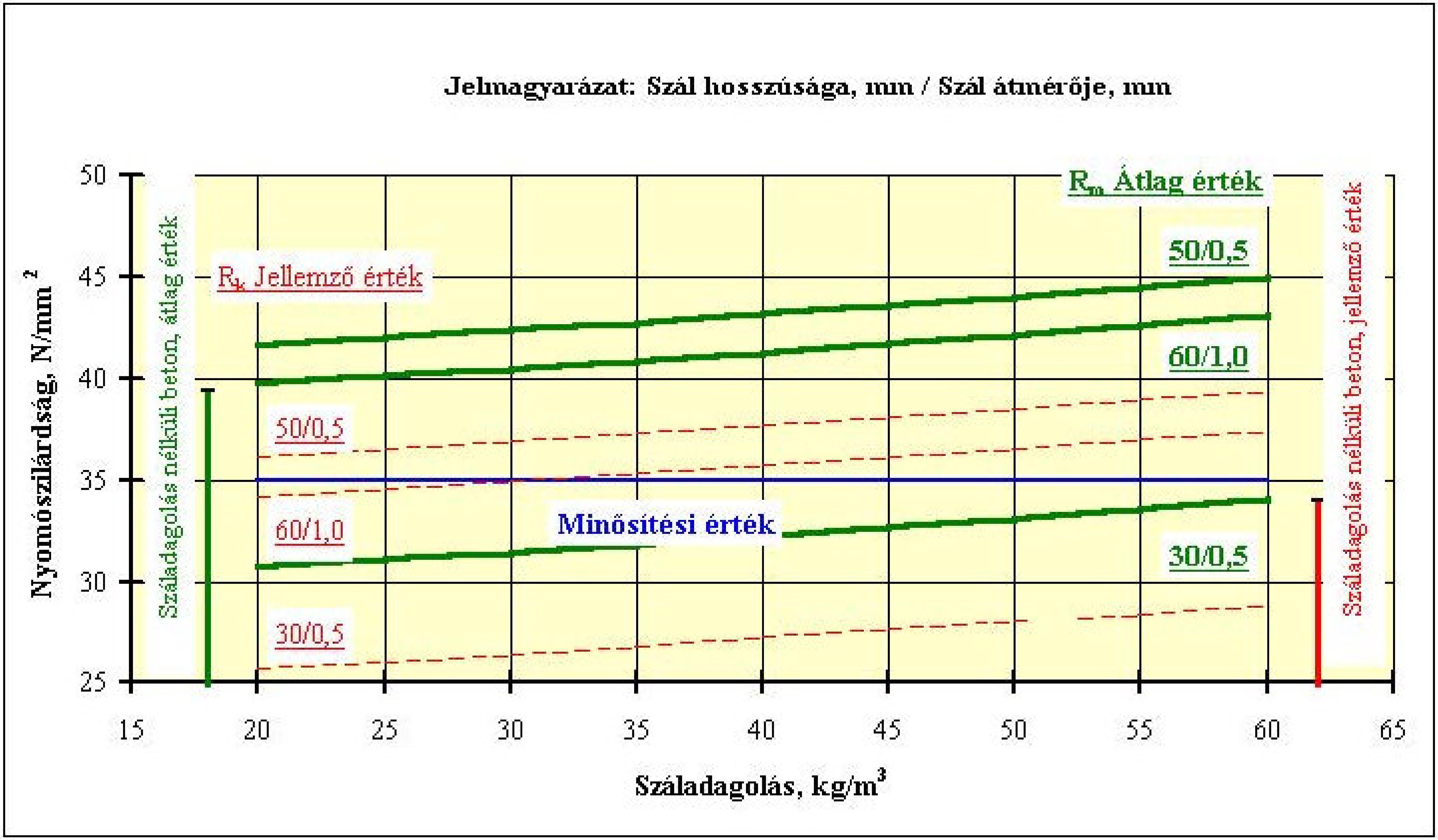
Szabvány vagy műszaki előírás jele	JSCE-SF2 és JSCE-SF5	DBV-Merkblatt Anhang A	UNE 83-504, UNE 83-505, UNE 83-506, UNE 83-507, UNE 83-508
Próbatest alakja	Henger	Henger vagy kocka, excentrikus terhelés esetén fejkiképzésű henger	Henger
Próbatest arányok és méretek	Magasság az átmérő kétszerese. Ha a szálhosszúság meghaladja a 40 mm-t, akkor az átmérő 150 mm, ha nem haladja meg, akkor 100 mm	Központos terhelés esetén a henger átmérője 150 mm, magassága 300 mm, a kocka mérete 150 mm. Excentrikus terhelés esetés a magasság (750 mm) az átmérő (250 mm) háromszorosa	Legkisebb mérete legalább $3*d_{max}$ illetve a szálhosszúság kétszerese. Átmérő 150 mm, magasság 300 mm. Fúrt minta esetén az átmérő legalább 100 mm, a magasság az átmérő kétszerese, esetleg az átmérővel azonos érték
Nyomott felület kialakítása	Ha kizsaluzás előtt történik, akkor anyaga 2 órás cementpép. Ha kizsaluzás után történik, akkor anyaga hevített kénhabarcs vagy gipsz vagy gipszes cementpép		Hevített kénhabarcs
Alakváltozás mérés	A henger magasságának felében kell mérni, de a mérés nem kötelező	Csak hengeren végezhető, a henger magasságának felében kell mérni	A henger magasságának felében kell mérni
Terhelés növelésének sebessége	0,2 - 0,3 N/mm^2 másodpercenként		Nyomószilárdság mérés esetén: 0,3 - 0,7 N/mm^2 másodpercenként
Alakváltozás-vezérelt terhelés növelés	Ajánlott	0,2 mm elmozdulás percenként	Alakváltozás mérés esetén: 0,1 - 0,3 mm elmozdulás percenként
Terhelés	Központos	Központos vagy kis excentricitású vagy normális excentricitású	Központos
Számított eredmény	Nyomószilárdság, σ–ε görbe, nyomási munka (görbe alatti terület ε = 0-0,75 % abszcissza értékek között), nyomószívóssági tényező (fajlagos nyomási munka)	Nyomószilárdság, rugalmassági modulus, σ–ε görbe	Nyomószilárdság, σ–ε görbe, nyomási munka (görbe alatti terület ε = 0-0,75 % abszcissza értékek között)

Megjegyzés: A száladagolás a beton nyomószilárdságára kisebb hatással van, mint a hajlító-húzószilárdságra illetve a hajlító-húzószívósságra, szabatos vizsgálata mégis fontos, hiszen a szálerősítésű beton nyomószilárdsági osztályának meghatározása mindig elvégzendő feladat.

Példaképpen az *OTKA T 007382* sz. kutatás keretében mért nyomószilárdsági függvényeket mutatunk be a *3. és a 4. ábrán*.



3. ábra: Φ 150*300 mm méretű próbahengeren mért nyomószilárdság C 20 nyomószilárdsági osztályú referencia beton és hajlított végű Dramix szálak alkalmazásával, d_{max} = 16 mm mellett



4. ábra: Φ 150*300 mm méretű próbahengeren mért nyomószilárdság C 35 nyomószilárdsági osztályú referencia beton és hajlított végű Dramix szálak alkalmazásával, d_{max} = 16 mm mellett

7. HAJLÍTÓ-HÚZÓVIZSGÁLAT HARMADPONTOS TERHELÉSSEL

Feldolgozott szabványok és műszaki előírások: NBN B 15-238, AFNOR P 18-409, JSCE-SF2, JSCE-SF4, DBV-Merkblatt:1991, DBV-Merkblatt:09.92, DBV-Merkblatt: Anhang A, Vorläufige Richtlinien:1985, UNE 83-504, UNE 83-509, UNE 83-510, ASTM C 1018

4. táblázat: A hajlító-húzószilárdság vizsgálatok rendje

Szabvány vagy műszaki előírás jele	NBN B 15-238	AFNOR P 18-409	JSCE-SF2 JSCE-SF4	DBV-Merkblatt:1991 és 09.92 és Anhang A	UNE 83-504, UNE 83-509, UNE 83-510	ASTM C 1018
Próbagerenda arányok és méretek	150*150*600 mm	140*140*560 mm	Ha a szál-hosszúság meghaladja a 40 mm-t, akkor 150*150*530 mm, ha nem haladja meg, akkor 100*100*380 mm	150*150*700 mm (Vorläufige Richtlinien: 1985 szerint a hajlító-húzószilárdságot 350* 100*10 mm méretű lemezen kell vizsgálni)	150*150*600 mm és 100*100*400 mm. A gerenda legkisebb mérete nem lehet kisebb, mint a szál hosszának kétszerese	100*100*350 mm
Támaszköz, l	450 mm	420 mm	450 mm vagy 300 mm	600 mm		300 mm
Lehajlás mérés	Fesztáv közepén, a semleges vonaltól, legalább l /150 mm lehajlásig	Fesztáv közepén, a semleges vonaltól, legalább 3 mm lehajlásig	Fesztáv közepén, a semleges vonaltól, legalább l /150 mm lehajlásig	Fesztáv közepén, a semleges vonaltól, l /150 mm lehajlásig		A terhelő fejnél méri és a támaszok elmozdulását korrigálja. Az első repedési lehajlás 5,5-szörösség
Terhelés növelés hajlító-húzószilárdság méréshez					0,8-1,2 N/mm^2 percenként	
Lehajlás- vezérelt terhelés növelés	0,03-0,11 mm/perc, amely 0,5 mm felett 0,3-0,7 mm/perc értékre növelhető	0,22-0,28 mm/perc között	l /1500 és l /3000 mm/perc között	Max. 0,5 mm/perc	l /1500 és l /3000 mm/perc között	0,05-0,10 mm/perc, de a vizsgálat végén ennek csak 0,87-szerese
Hajlítási szívósság, [N*mm]	Terhelés-lehajlás görbe alatti terület, a terhelés kezdetétől adott l/n lehajlásig		Terhelés-lehajlás görbe alatti terület, a terhelés kezdetétől adott l/n= l /150 mm lehajlásig	Terhelés-lehajlás görbe alatti terület, a terhelés kezdetétől adott l/n = l /150 mm lehajlásig	Terhelés-lehajlás görbe alatti terület, a terhelés kezdetétől adott l/n = l /150 mm lehajlásig	Terhelés-lehajlás görbe alatti terület, a terhelés kezdetétől adott l/n lehajlásig és az első repedéshez tartozó terület hányadosa

Relatív hajlítási szívósság, [-]	Adott l/n lehajlást okozó teher és az első repedést okozó teher hányadosa	Adott l/n lehajlást okozó teher és az első repedést okozó teher hányadosa		Ismeri az egyenértékű hajlító-húzószilárdság fogalmát, amit a megrepedt kereszt-metszetre vonatkoztat	Hajlítási szívósság osztva a terhelés-lehajlási görbén az első repedéshez tartozó görbe alatti területtel	
Számított eredmény	A hagyományos és legnagyobb hajlító-húzószilárdság, a hajlító-húzófeszültség az első repedésnél, a hajlítási szívósság jellemzői	A hagyományos és legnagyobb hajlító-húzószilárdság, a hajlító-húzófeszültség az első repedésnél, a relatív hajlítási szívósság	A legnagyobb hajlító-húzószilárdság, a hajlítási szívósság	A legnagyobb hajlító-húzószilárdság, az egyen-értékű hajlító-húzószilárdság, a hajlítási szívósság	A hajlító-húzószilárdság, az első repedéshez tartozó feszültség, a hajlítási szívósság, a relatív hajlítási szívósság	A hagyományos és legnagyobb hajlító-húzószilárdság, a hajlító-húzófeszültség az első repedésnél, a hajlítási szívósság

Megjegyzés: A szálerősítésű beton hajlító-húzóvizsgálata több érdekes feltételt tartalmaz.

Fontos előírás, hogy a lehajlást a semleges tengelyhez képest kell mérni. A próbagerenda két oldalán elhelyezkedő egy-egy érzékelő a próbagerenda támaszvonalai és a geometriai hossztengely metszéspontjában lévő csapokon felfekvő acélpálcákon - mint elmozdulás mentes alapvonalakon - ül, az elmozdulás érzékelő tűk pedig a próbagerenda tetejére erősített, azzal együtt lehajló konzolokra támaszkodnak (*5. ábra*).

Követelmény a lehajlás-vezérelt terhelés növelés, amelyet hagyományos szilárdságvizsgáló gépekkel is meg lehet oldani úgy, hogy a szilárdságvizsgáló géphez csatlakoztatott számítógép a lehajlás érzékelőjének jelét feldolgozva vezérli a hidraulikát. A szabványok a lehajlások megkövetelt értékét az idő függvényében adják meg. Legszűkebb korlátokat az AFNOR, legtágabbakat az NBN szab meg (*6. ábra*).

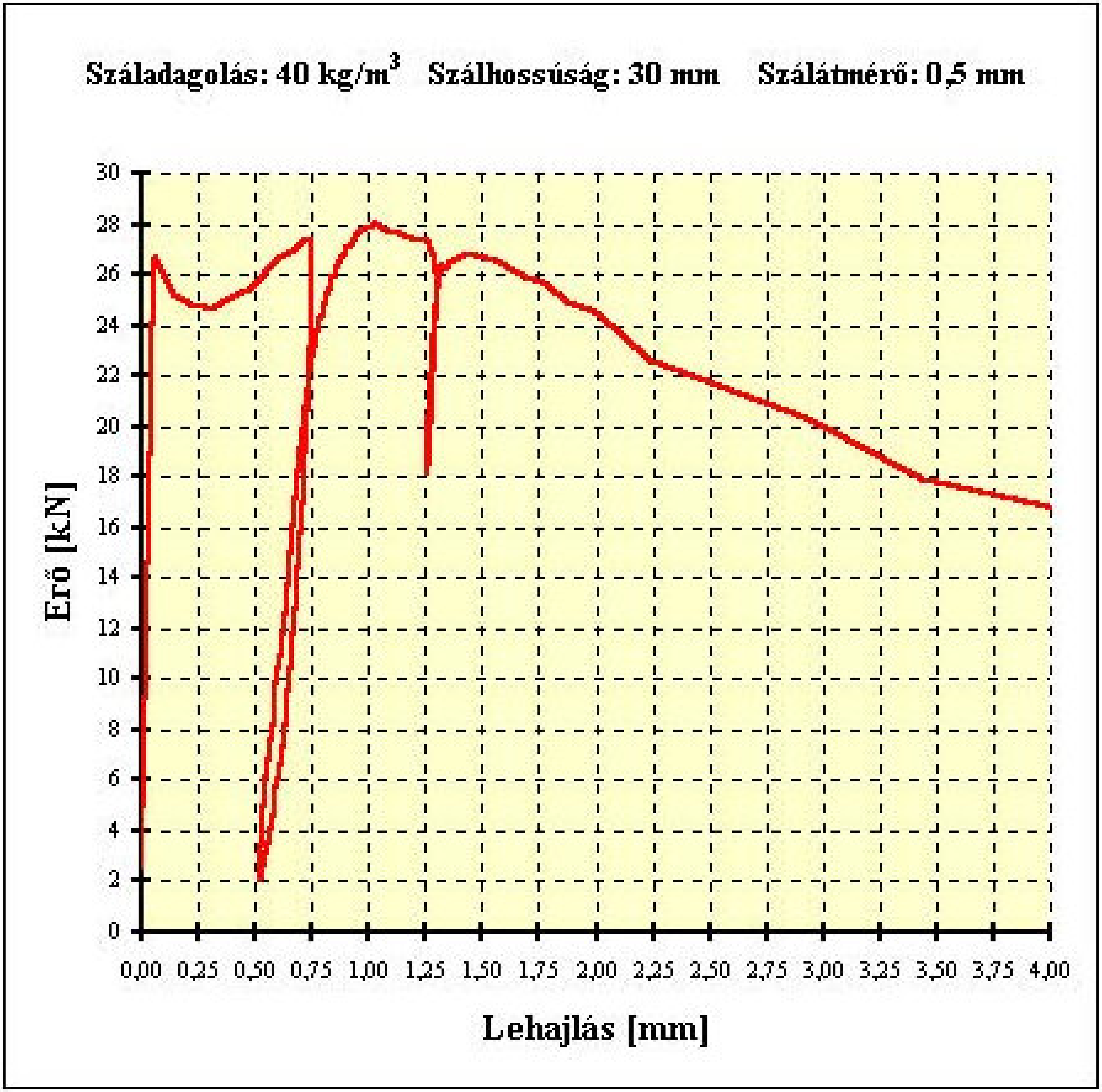
A számítógép csak olyan idő intervallumokban adhat vezérlési utasítást, amelyek elég ritkák ahhoz, hogy a szilárdságvizsgáló gép hidraulikája és mechanikája azokat követni tudja. A gép tehetetlensége folytán nagyobb lehajlásokkor előfordul, hogy a terhelőerő igen erősen visszaesik, hogy a rendszer a lehajlás-vezérelt terhelés növelés követelményének megfelelhessen. Ez tulajdonképpen az első repedés fellépését követően megjelenő ún. “parazita jelenség”, amelynek kezeléséről a szabványok külön intézkednek. Az *OTKA T 007382* sz. kutatás keretében felvett erő-lehajlás, erő-idő, lehajlás-idő görbékre az *7.-12. ábrákon* mutatunk be példát. A “parazita jelenség” fellépte esetleges, így míg az *7.-9. ábrákon* határozottan megjelenik, addig a *10.-12. ábrákon* nem lehet észlelni.

A szálerősítés nélküli betonok vizsgálatához képest újszerű a mérési eredmények értékelés módja, a hajlítási szívósság fogalma, számítása, és felhasználásával ok-okozati összefüggések keresése. A *13. és 14. ábrán* ugyancsak az *OTKA T 007382* sz. kutatás keretében felírt hajlítási szívósság összefüggések láthatók. A hajlító vizsgálat és a hajlítási szívósság fogalomkörét külön “noteszlapon” elemezzük.

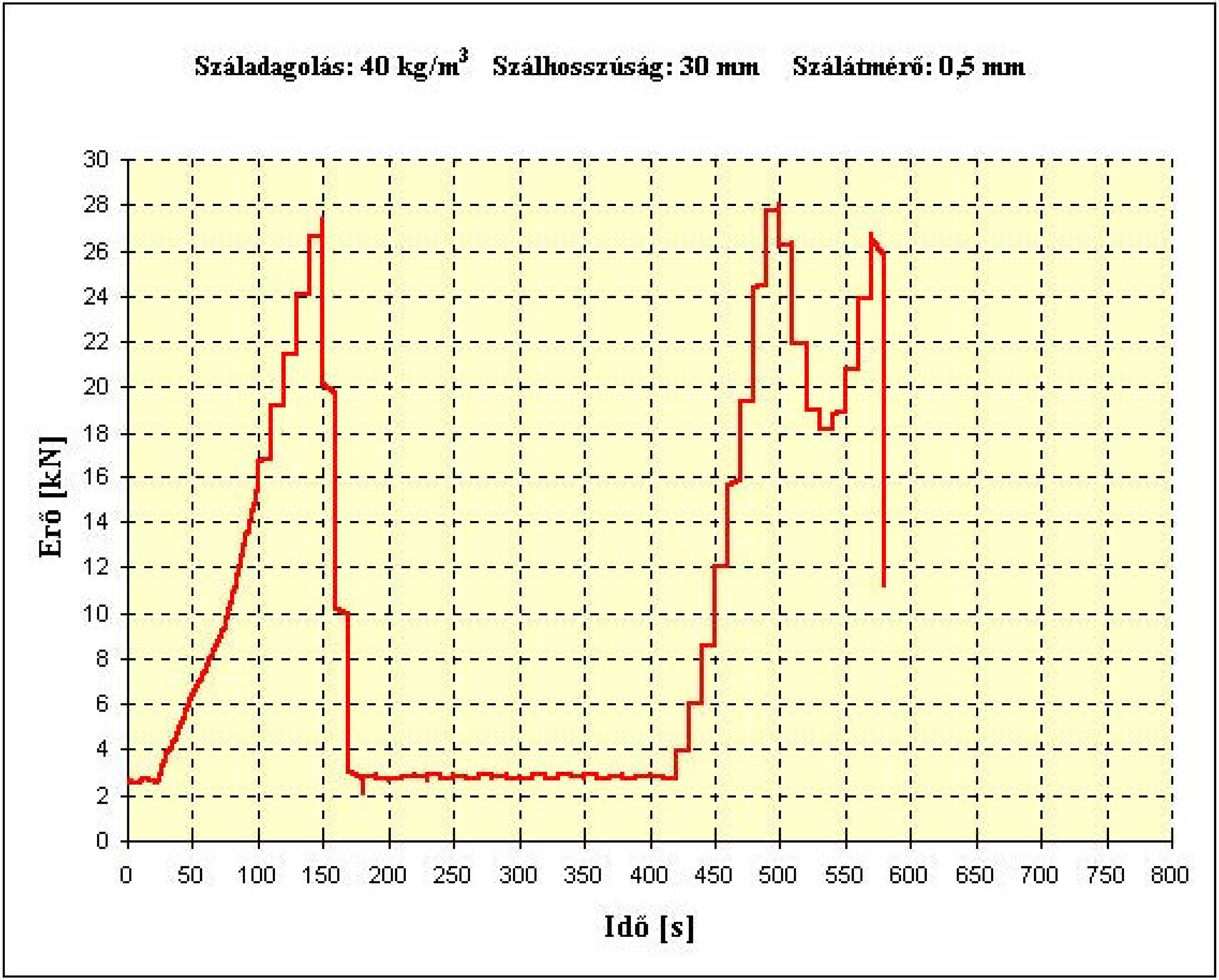
A hajlítási szívósság mérése mutat rá arra, hogy a szálerősítésű beton a beton megrepedését követően a terhek további hordására képes, szívósan és képlékenyen viselkedik, szemben a szálerősítés nélküli betonnal, amely ridegen törik, és képlékeny alakváltozási tartománnyal nem rendelkezik.

5. ábra: A lehajlás mérés elrendezése

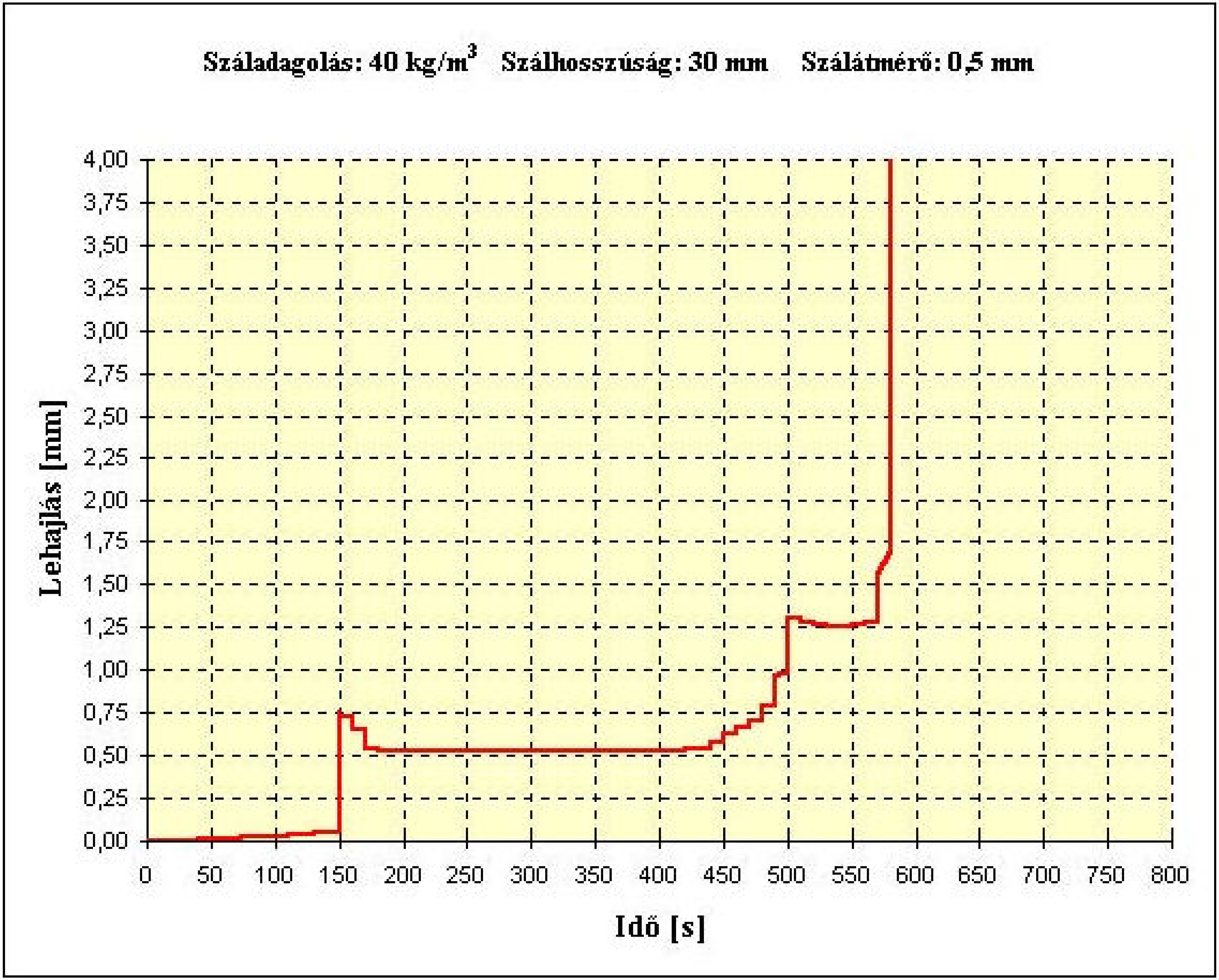
6. ábra: A próbagerenda előírt lehajlása a lehajlás-vezérelt terhelőerő hatására, az idő függvényében



7. ábra: Hajlított próbagerenda erő-lehajlás diagramja, C 20 nyomószilárdsági osztályú referencia beton és hajlított végű Dramix szálak alkalmazásával, d_{max} = 16 mm mellett

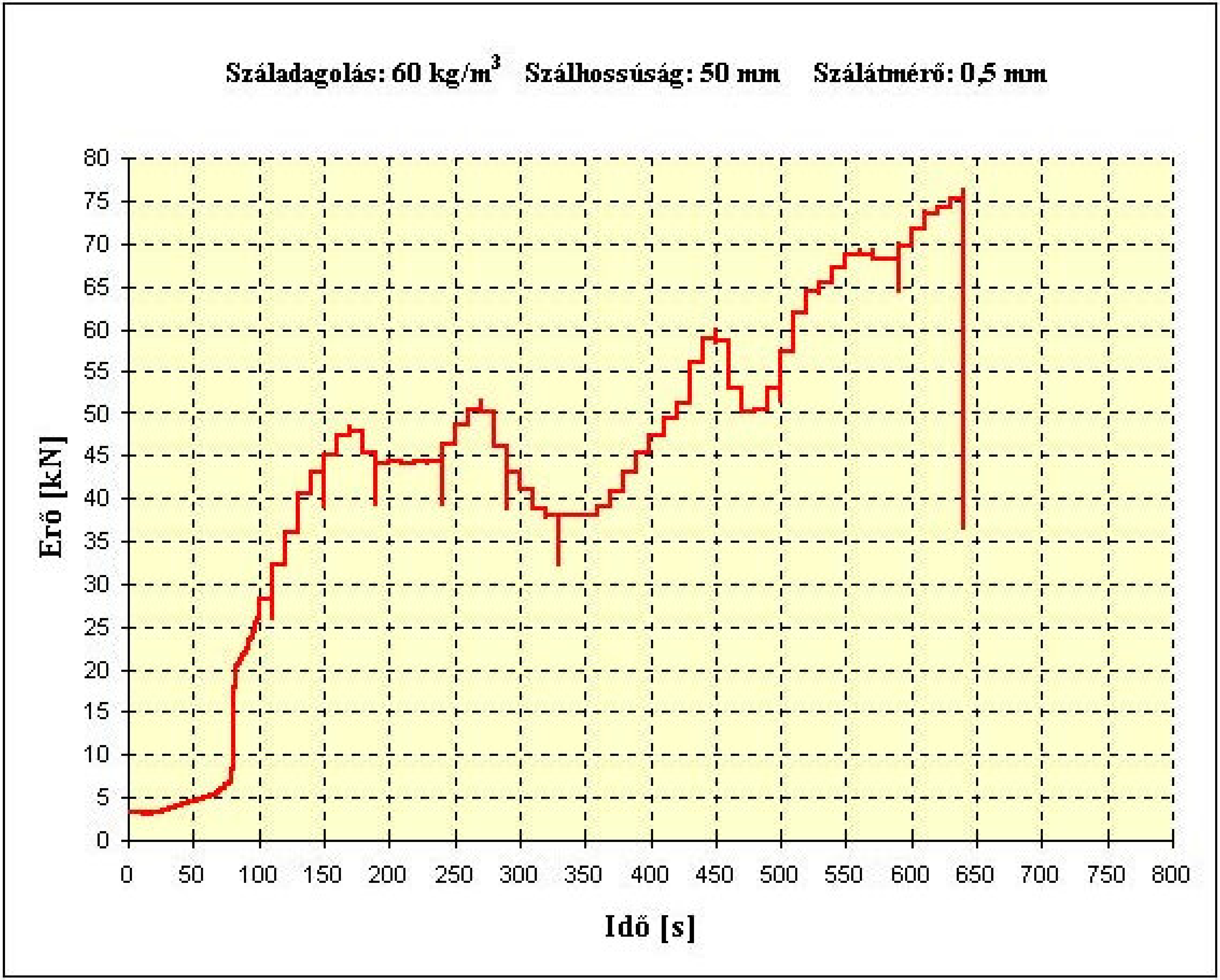


8. ábra: Hajlított próbagerenda erő-idő diagramja C 20 nyomószilárdsági osztályú referencia beton és hajlított végű Dramix szálak alkalmazásával, d_{max} = 16 mm mellett

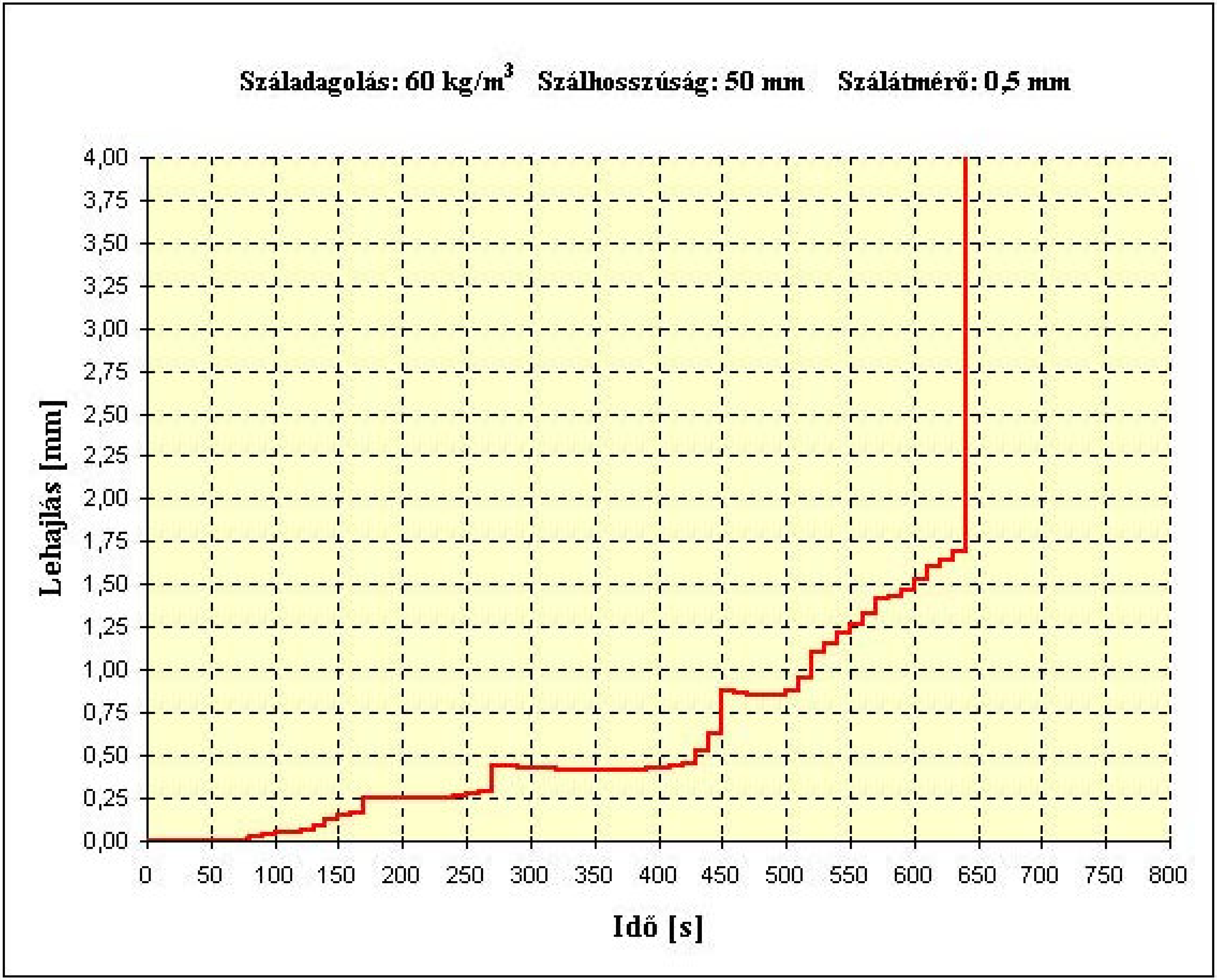


9. ábra: Hajlított próbagerenda lehajlás-idő diagramja C 20 nyomószilárdsági osztályú referencia beton és hajlított végű Dramix szálak alkalmazásával, d_{max} = 16 mm mellett

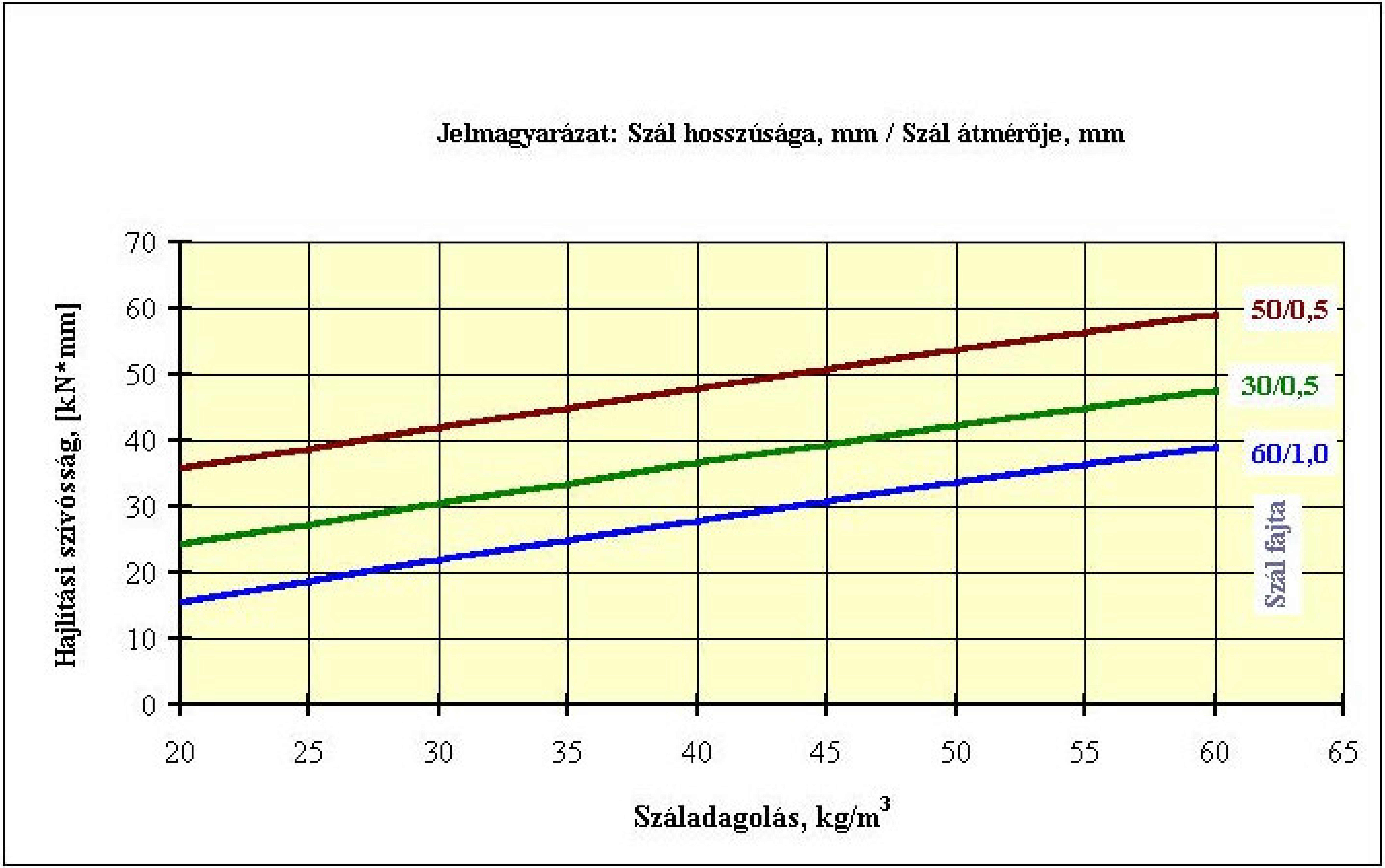
10. ábra: Hajlított próbagerenda erő-lehajlás diagramja C 35 nyomószilárdsági osztályú referencia beton és hajlított végű Dramix szálak alkalmazásával, d_{max} = 16 mm mellett



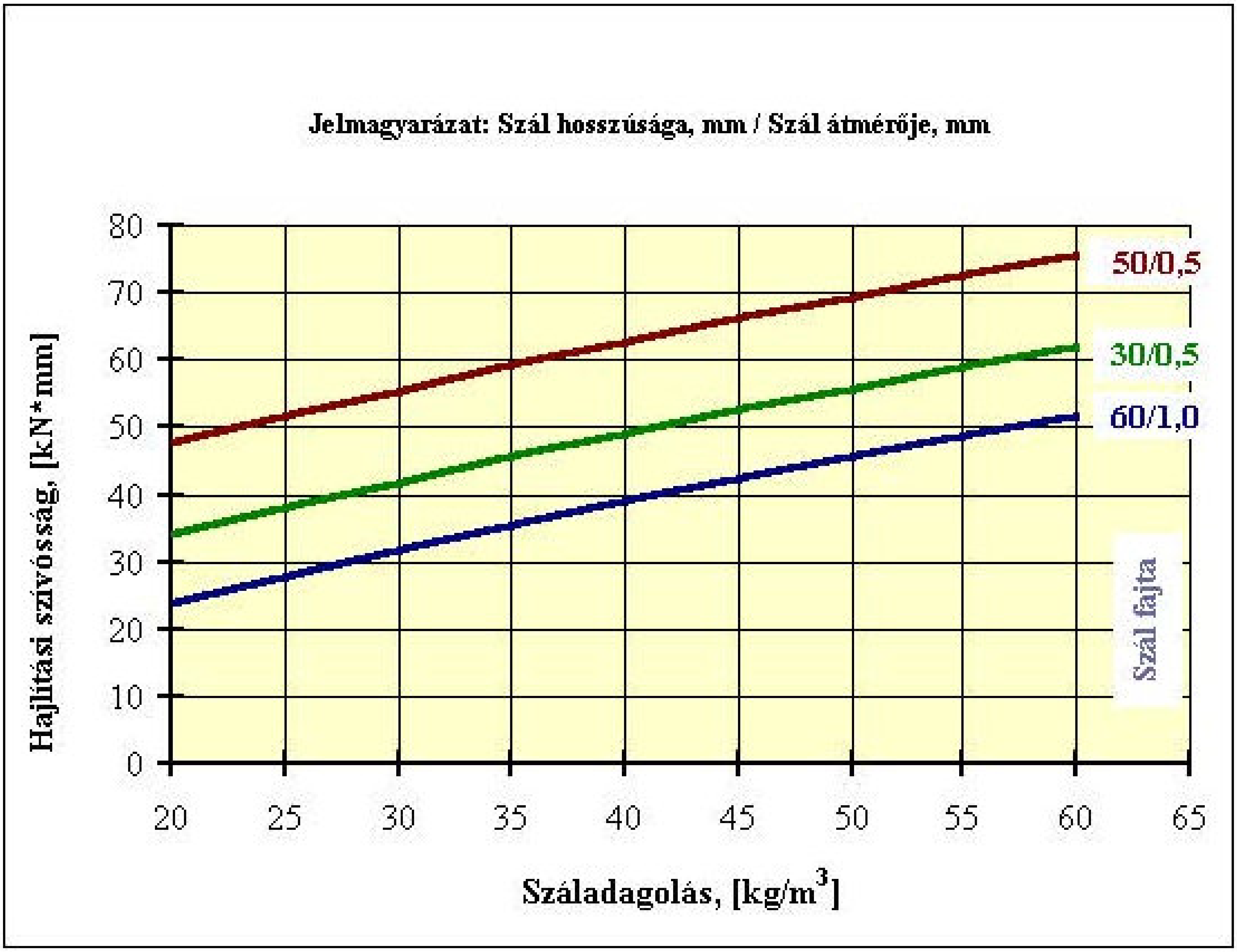
11. ábra: Hajlított próbagerenda erő-idő diagramja C 35 nyomószilárdsági osztályú referencia beton és hajlított végű Dramix szálak alkalmazásával, d_{max} = 16 mm mellett



12. ábra: Hajlított próbagerenda lehajlás-idő diagramja C 35 nyomószilárdsági osztályú referencia beton és hajlított végű Dramix szálak alkalmazásával, d_{max} = 16 mm mellett



13. ábra: 150*150*600 mm méretű próbagerendán mért hajlítási szívósság C 20 nyomószilárdsági osztályú referencia beton és hajlított végű Dramix szálak alkalmazásával, d_{max} = 16 mm mellett, 1,5 mm lehajlási határértéknél



14. ábra: 150*150*600 mm méretű próbagerendán mért hajlítási szívósság C 35 nyomószilárdsági osztályú referencia beton és hajlított végű Dramix szálak alkalmazásával, d_{max} = 16 mm mellett, 1,5 mm lehajlási határértéknél

8. MEGÁLLAPÍTÁSOK

A szálerősítésű betonok fejlesztését laboratóriumi kísérletek, alkalmazását laboratóriumi és építéshelyi vizsgálatok nélkül megvalósítani nem lehet. Minthogy azonban a szálerősítésű betonok tulajdonságai több vonatkozásban is eltérnek a hagyományos, szálat nem tartalmazó betonok tulajdonságaitól, vizsgálati módszereik is sajátosak és a technológia térhódításával kölcsönhatásban fejlődnek. Azon vizsgálati módszerek, amelyek végrehajtásában megállapodás születik, szabvány vagy műszaki előírás alakjában öltenek testet. Ezek a műszaki színvonalat is tükrözik, hiszen nemcsak a vizsgálatok módjáról, hanem a szálerősítésű betonok tulajdonságairól is szólnak és az anyagtani követelményektől sem vonatkoztatnak el. A szálerősítésű betonok vizsgálatának egységesítése, az anyagtól várt teljesítőképesség megfogalmazása hazánkban rendkívül időszerű, ezért nyolc nemzet 39 szabványának, műszaki előírásának tanulmányozásával és népszerűsítésével a feladat megoldásához kívántunk hozzájárulni. E munka közben a következő megállapításokra jutottunk.

A.) A feldolgozott szabványok és műszaki előírások sok hasonló módon végzendő vizsgálatot írnak le, amelyek alapján a legfontosabb eljárások hazai szabványosítása megoldható lenne. Ezek tulajdonképpen azok a vizsgálatok, amelyeket elemeztünk: a szálak teljesítőképességének, a konzisztenciának, a nyomószilárdságnak, a hajlító-húzási tulajdonságoknak a vizsgálata. A várható vizsgálati nehézségek nemcsak a szálerősítésű beton vizsgálatával kapcsolatosak: például a nyomóvizsgálati hengerek nyomott felületének hevített kénhabarcsos kellősítésében, a próbatesten mért alakváltozás illetve lehajlás által vezérelt terhelés növelésben nem nagyon van gyakorlatunk.

B.) A szálerősítésű betonnak nincs minősítő szabványa, nincs jele. Az MSZ 4719-82 hatálya nem terjed ki a szálerősítésű betonra, csak a szálat befogadó betonra. A szálat befogadó beton az építmény szempontjából azonban csak félkész keverék, amelynek minősítésénél nem szabad megállni, azt ki kell terjeszteni a beépítésre kerülő készkeverékre, a szálerősítésű betonra is. Ezért elkerülhetetlen annak megfogalmazása, hogy mit értünk a szálerősítésű beton konzisztenciáján és nyomószilárdságán. Fontos a hajlító-húzószilárdság és szívósság fogalmának és vizsgálatának körülírása is, hiszen a szálerősítésű betont épp olyan területeken alkalmazzák, amelyek a húzások szempontjából kényesek. Ennek a követelménynek az érvényesítésében az útépítő betontechnológusok élen járnak.

C.) Vannak a feldolgozott szabványoknak olyan fejezetei is, amelyek nem elhanyagolhatók, de elemzésükre jelen dolgozatban nem kerülhetett sor: a szálak alak, szakítószilárdság, korrózióállóság szerinti vizsgálata, a száltartalom meghatározása, a szálerősítésű beton próbatest elkészítése, tömörítése, a szilárdságvizsgálat során az első repedést követően fellépő pontatlanságok ("parazita jelenség") kezelése az alakváltozási vagy lehajlási diagramon, a nyírószilárdság vizsgálata, a lemez alakú próbatestek átszúródás vizsgálata, korong alakú próbatestek ütésállóság vizsgálata, excentrikus nyomóvizsgálat, stb.

D.) A szabványok tanulmányozásával kikristályosodott vizsgálatok, de nem feltétlenül végleges nézetek ismerhetők meg. A fejlődés legújabb eredményei a friss irodalomban olvashatók, amelyek a szabványok korszerűségének ellenőrzésére is alkalmasak.

E.) A feldolgozott területre vonatkozó európai vagy nemzetközi szabályozásról nincs tudomásunk, az Eurocode-2, az ENV 206 dokumentumok e kérdést nem érintik. A helyzet a jövőben bizonyára változni fog, nem rég értesültünk arról, hogy például az üvegszál erősítésű előregyártott betontermékek európai vizsgálati szabványsorozata (EN 1170) már kidolgozás alatt áll.

9. HIVATKOZÁSOK

9.1. SZABVÁNYOK ÉS MŰSZAKI ELŐÍRÁSOK

9.1.1. Magyar szabványok

MSZ 15450/3-82	Beton és vasbeton termékek csatornaépítéshez. Körszelvényű acélhajbeton-cső bekötőcsonkkal
MSZ 15450/5-82	Beton és vasbeton termékek csatornaépítéshez. Körszelvényű acélhajbeton cső
MI-04.117-79	Acélhajbeton építőipari alkalmazása
MI-04-155-1990	Vagdalt polipropilénszál erősítésű beton és homokbeton

9.1.2. Belga szabványok

NBN B 15-238:1992	Proeven op vezelversterkt beton - Bugproef op prismatische proefstukken
	Szálerősítésű beton vizsgálata - Hajlítási vizsgálat hasáb alakú próbatesten
NBN B 15-239:1992	Karakterisering van staalvezels op basis van de conventionele buigtreksterkte
	Acélszálak jellemzése hagyományos hajlító-húzószilárdság alapján

9.1.3. Francia szabvány és műszaki előírás

AFNOR P 18-409:1993	Béton avec fibres métalliques. Essai de flexion Szálerősítésű beton. Hajlítási vizsgálat
S.N.C.F. Ref. 5876:1989	Région de Toulouse. Tunnel de Grand Mergieux. Travaux de confortement de l'ouvrage. Cahier des Prescriptions Speciales (CPS) Francia Államvasutak, Toulouse-i Körzet. Grand Mergieux alagút. Műtárgy átalakítási munkák. Különleges előírások füzete

9.1.4. Japán műszaki előírások

JSCE-SF1:1984	Method of making steel fiber reinforced concrete in the laboratory Acélszálerősítésű betonok készítése laboratóriumban
JSCE-SF2:1984	Method of making specimens for strength and toughness tests of steel fiber reinforced concrete Próbatestek készítése acélszálerősítésű betonok szilárdsági és szívóssági vizsgálatához
JSCE-SF3:1984	Method of making specimens for strength and toughness tests of shotcreted steel fiber reinforced concrete Próbatestek készítése acélszálerősítésű lőttbetonok szilárdsági és szívóssági vizsgálatához
JSCE-SF4:1984	Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete Acélszálerősítésű betonok hajlító-szilárdságának és hajlítási szívósságának vizsgálata

JSCE-SF5:1984	Method of tests for compressive strength and compressive toughness of steel fiber reinforced concrete Acélszálerősítésű betonok nyomószilárdságának és nyomási szívósságának vizsgálata
JSCE-SF6:1984	Method of tests for shear strength of steel fíber reinforced concrete Acélszálerősítésű betonok nyírószilárdságának vizsgálata
JSCE-SF7:1984	Method of tests for fíber content of steel fíber reinforced concrete Acélszálerősítésű betonok száltartalmának meghatározása

9.1.5. Német műszaki előírások

DBV-Merkblatt:1991	Grundlagen zur Bemessung von Industriefußböden aus Stahlfaserbeton Acélszálerősítésű betonból készített ipari padlóburkolat méretezésének alapjai
DBV-Merkblatt:1992. Aug.	Technologie des Stahlfaserbetons- und Stahlfaserspritzbetons Az acélszálerősítésű beton és lőttbeton technológiája
DBV-Merkblatt:1992. Sept.	Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau Az alagútépítési acélszálerősítésű beton méretezésének alapjai
DBV-Merkblatt. Anhang:1992	Anhang A. Empfehlungen für Einzelprüfungen A. függelék. Ajánlások egyedi vizsgálatokhoz Anhang B. Empfehlungen für Einstufungs-, Eignungs- und Güteprüfungen B. függelék. Ajánlások besorolási, alkalmassági és minőségi vizsgálatokhoz

Vorläufige Richtlinien:1985	Vorläufige Richtlinien für die Prüfung und Güteüberwachung von Erzeugnissen aus Faserbeton Előzetes irányelvek a szálerősítésű beton termékek vizsgálatához és minőségellenőrzéséhez

9.1.6. Osztrák szabvány

ÖNORM B 5073:1989	Stahlfaserbetonrohre und zugehörige Formstücke. Anforderungen, Prüfung und Gütesicherung Acélszálerősítésű betonból készült csövek és idomdarabok. Követelmények, vizsgálatok és minőségbiztosítás

9.1.7. Spanyol szabványok

UNE 83-500-89 Parte 1	Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Clasificacion y definiciones. Parte 1. Fibras de acero para el refuerzo de hormigones Acél és/vagy polipropilén szállal erősített betonok. Osztályozás és meghatározások. 1. rész. Acélszálak a. betonok megerősítésére
UNE 83-500-89 Parte 2	Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Clasificacion y definiciones. Parte 2. Fibras de polipropileno para el refuerzo de hormigones Acél és/vagy polipropilén szállal erősített betonok. Osztályozás és meghatározások 2. rész. Polipropilén szálak a betonok megerősítésére
UNE 83-501-86	Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Toma de muestras de hormigon fresco Acél és/vagy polipropilén szállal erősített betonok. A beton mintavétele
UNE 83-502-88	Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Fabricación en laboratorio Acél és/vagy polipropilén szállal erősített betonok. Laboratóriumi betonkeverés
UNE 83-503-88	Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Medida de docilidad por medio del cono invertido Acél és/vagy polipropilén szállal erősített betonok. Konzisztencia fordított tölcsérrel mérve

UNE 83-504-90	Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Fabricación de probetas para los ensayos de laboratorio. Acél és/vagy polipropilén szállal erősített betonok. Próbatestek készítése laboratóriumi vizsgálatra
UNE 83-505-86	Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Extraccion y conservacion de probetas testigo Acél és/vagy polipropilén szállal erősített betonok. Próbatestek kifúrása és tárolása
UNE 83-506-86	Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Refrentado de probetas con mortero de azufre Acél és/vagy polipropilén szállal erősített betonok. Próbatestek homlokfelületének kialakítása kénhabarccsal
UNE 83-507-86	Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Rotura por compresión Acél és/vagy polipropilén szállal erősített betonok. Nyomószilárdság vizsgálat
UNE 83-508-90	Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Determinación del indice de tenacidad a. compresión Acél és/vagy polipropilén szállal erősített betonok. Nyomási munka meghatározása
UNE 83-509-88	Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Rotura por flexotraccion Acél és/vagy polipropilén szállal erősített betonok. Hajlító-húzószilárdság vizsgálat
UNE 83-510-89	Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Determinación del indice de tenacidad de resistencia a primera fisura Acél és/vagy polipropilén szállal erősített betonok. Az első repedés szívóssági ellenállási együtthatójának meghatározása (hajlító-húzószilárdság)
UNE 83-511-89	Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Determinación de la. resistencia a cortante Acél és/vagy polipropilén szállal erősített betonok. Nyírószilárdság meghatározása

UNE 83-512-89 Parte 1	Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Parte l. Determinación del contenido de fibras de acero Acél és/vagy polipropilén. szállal erősített betonok. 1. rész. Acélszál tartalom meghatározása
UNE 83-514-90	Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Determinación de la resistencia. Al impacto Acél és/vagy polipropilén szállal erősített betonok. Ütési mérték meghatározása. Kísérlet

9.1.8. USA szabványok

ASTM A 820-90	Standard Specification for Stee1 Fibers for Fiber Reinforced Concrete Szabványos előírások a betonba kerülő acélszálakról
ASTM C 995-91	Standard Test Method for Time of Flow of Fiber-Reinforced Concrete Through Inverted Slump Cone Szabványos vizsgálati módszer szálerősítésű beton fordított ejtő kúpon való átfolyási idejének meghatározására
ASTM C 1018-89	Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete. (Using Beam With Third-Point Loading) Szabványos vizsgálati módszer szálerősítésű betonok hajlítási szívósságának és első repedési szilárdságának meghatározására. (Harmadponton terhelt gerenda felhasználásával)

9.2. IRODALOM

Balázs L. Gy. szerkesztésében: Szálerősítésű Betonok - a kutatástól az alkalmazásig -. A *fib* Magyar Tagozata által rendezett konferencia kiadványa. Budapest, 1999. március 4.-5.

Dombi J.: Acélszál-erősítésű nagy átmérőjű SIOME betoncsövek teherbírása. SZIKKTI 50. sz. tudományos közleménye, Budapest, 1976.

Kausay T.: Acélhuzal-szálerősítésű betonok tulajdonságai és teherbírása. I. rész. Építőanyag. 46. évf. 1994. 6. szám. pp. 166-173.

Kausay T.: Acélhuzal-szálerősítésű betonok tulajdonságai és teherbírása. OTKA T- 007382 sz. kutatási téma. Zárójelentés, 1996.

Nemegeer, D. E. - Teutsch, M.: Möglichkeiten und Anwendungsgebiete des Stahlfaserbetons. Betonwerk + Fertigteil-Technik. Jg. 59. 1993. Heft 11. pp. 74-80.

Szabó I.: Acélhajbeton. Műszaki Könyvkiadó. Budapest, 1976.

10. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző köszönetet mond az **Országos Tudományos Kutatási Alapnak**, hogy a munkára lehetőséget biztosított, **Dr. Dulácska Endre** professzor úrnak, a műszaki tudományok doktorának (*Budapesti Műszaki Egyetem*) az együttműködésért, **Jef Verbaeys** (*Bekaert GmbH Austria*) és **Dr. Dirk E. Nemegeer** (*N. V. Bekaert S.A. Zwevegem, Belgium*) uraknak önzetlen tanácsaikért, és **minden kollégájának**, akik a kutatás megvalósításában segítségére voltak.

beton SZIKKTI

Dramix-beton hajlító-kísérlet eredményeinek tanulmányozása Jef Verbaeys úrral (Bekaert Austria) Budapest, 1993. szeptember hó.

BEKAERT
RC- 80/60-BN
60X20 KG
WEIGHT:1200 KG NET
KEEP DRY
Dramix
Dramix
20 Kg
01 03 23

BEKAERT
Dramix®

Száz év tervezési élettartamú beton

A beton, vasbeton, feszített vasbeton szerkezet és a készítéséhez használt beton akkor tartós, ha a terhelő erőkből és terhelő mozgásokból adódó igénybevételeket, valamint a környezeti hatásokat – üzemszerű használat és megfelelő karbantartás mellett, de jelentős javítási munkák nélkül – a tervezési élettartam alatt károsodás nélkül viseli.

A tervezési élettartam követelmény (előírás), míg a használati élettartam tényleges, tapasztalati érték. A tartós beton használati élettartama nagyobb, vagy legalább egyenlő kell legyen, mint a szerkezet tervezési élettartama: Használati élettartam ≥ Tervezési élettartam

A tervezési élettartam, illetve a használati élettartam természetesen nem azonos a szavatossági vagy a jótállási idővel.

A tervezési élettartam éveket elvontan kell felfogni, azok tulajdonképpen a tartószerkezet tartósságának tervezési modellbeli fokozatai.

Az MSZ 4798 szabvány – követve az MSZ EN 206 szabvány feltételrendszerét – az 50 év tervezési élettartamú betonokra vonatkozik. Az MSZ 4798 szabványt 100 év tervezési élettartamú betonokra alkalmazva, a benne szereplő (dőlt betűvel írt) nemzeti ajánlások és tájékoztatások előírásnak tekintendők.

Tervezési élettartamok az MSZ EN 1990:2011 Eurocode 2 szabvány alapján

MSZ EN 1990:2011 Eurocode 2 szabvány			Tervezési élettartam osztályok tartószerkezeti betonjai
Tervezési élettartam osztály	Előírt tervezési élettartam, év, legalább	Példák	
1.	10	Ideiglenes tartószerkezetek. Az olyan tartószerkezeteket vagy azok részeit, amelyek újrafelhasználás céljából szétszerelhetők, és várhatóan újra fel is fogják használni, nem helyes ideiglenes szerkezetnek tekinteni. Nem szabad ideiglenes tekinteni az olyan kiegészítő szerkezeteket (például autópálya melletti, közel álló zajvédő falelemeket), amelyek cseréje a forgalom leállításával jár.	Ideiglenes tartószerkezetek betonja.
2.	10-25	Cserélhető tartószerkezeti részek, például darupálya tartók, saruk.	Cserélhető tartószerkezeti elemek betonja
3.	15-30	Mezőgazdasági és hasonló tartószerkezetek.	Mezőgazdasági tartószerkezetek betonja, Útpályabetonok, Padlóbetonok
4.	50	Épületek tartószerkezetei és egyéb szokásos tartószerkezetek.	Épületszerkezeti betonok, Autópályabetonok, Főútpályabetonok
5.	100	Monumentális épületek tartószerkezetei, hidak és más építőmérnöki szerkezetek.	Hídszerkezeti betonok, Repülőtéri pályabetonok
A feszített vasbetonszerkezeteket és azok betonját az építmény jellegétől függetlenül az 5. osztályba kell sorolni, és tervezési élettartamukat 100 évnek kell tekinteni.			

Az Eurocode 2 (MSZ EN 1992-1-1:2010, MSZ EN 1992-2:2009) és Eurocode 4 (MSZ EN 1994-1-1:2010, MSZ EN 1994-2:2009) szabvány a tervezési élettartamot az MSZ EN 1990:2011 szabvány 2.3. szakasza alapján írja elő, amelyben öt tervezési élettartam osztály szerepel (lásd a fenti táblázatot).

Az állandó beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek többsége általában a 3., a 4. vagy 5. tervezési élettartam osztályba tartozik. A betonnak a szerkezet tervezési élettartama alatt nem szabad tönkremennie, ezért a mezőgazdasági építmények tartószerkezeteit legalább 15 év tervezési élettartamú betonból, az épületek és egyéb szokásos építmények tartószerkezeteit, valamint az útpályaszerkezeteket legalább 50 év tervezési élettartamú, az ún. monumentális építmények, például a hidak, vízépítési és szennyvíztisztítási műtárgyak, erőművek stb. tartószerkezeteit legalább 100 év tervezési élettartamú betonból kell készíteni.

A monumentális jelző korántsem az épületszerkezetek vagy épületek, építmények megszokottnál nagyobb méreteire, hanem – a hidakhoz és más építőmérnöki szerkezetekhez, műtárgyakhoz hasonlóan – az épületek, illetve építmények, műtárgyak jelentőségére, értékére, tervezett tartósságára utal.

A monumentális épületek az MSZ EN 1990:2011 tartószerkezet tervezési szabvány 2.1. táblázatában az 5. tervezési élettartam osztályú építmények egyik példájaként szereplő kifejezés. Az ilyen építmények tartószerkezeteinek előírt tervezési élettartama 100 év. Az MSZ EN 1992-1-1:2010 (Eurocode 2) betonszerkezet tervezési szabvány NA2.2.1. szakasza szerint a 100 év tervezési élettartamú építmények esetén a beton nyomószilárdságának f_{cd} tervezési értékét $\alpha_{cc} = 0{,}85$ értékkel, a tartós terhelésnek a szilárdságra gyakorolt hatását figyelembe vevő tényezővel el kell osztani.

A 100 év tervezési élettartamú betonokról az MSZ 4798:2016, MSZ 4798:2016/1M:2017, MSZ 4798:2016/2M:2018 és MSZ 4798:2016/4M:2023 szabvány a következőképpen rendelkezik:

FONTOS MSZ 4798:2016/4M:2023

1. Az 1. *Alkalmazási terület* fejezet módosítása

Az MSZ 4798:2016/3M:2021 szerint törölt (10) bekezdés után a következő új, (11) bekezdést kell beszúrni:

4M (11) Az MSZ 4798 előírásai az 50 év tervezési élettartamú betonokra vonatkoznak, kivéve, ahol ettől eltérő tervezési élettartam van megadva. A 100 év tervezési élettartamú betonok esetén a tájékoztató N mellékletet (Betonfedés) és P mellékletet (A nyomószilárdság értékelése 50% elfogadási valószínűség mellett) előírásnak kell tekinteni. 4M

MSZ 4798:2016/4M:2023

7.3. *A fejezet végére be kell szúrni a következőt:*

*[4M] **6. példa:** Annak a C30/37 nyomószilárdsági osztályú nehézbetonnak a megjelölése, amelyből sugárvédő falazat épül, átlagos testsűrűsége szilárd állapotban 2600–3100 kg/m³ közé esik, adalékanyaga barit, környezeti osztálya XC4, névleges legnagyobb szemnagysága D_{max} = 24 mm, terülési mértéke 420–480 mm közé esik, konzisztenciaosztálya F3 (azaz a konzisztenciája „képlékeny") és a tervezési élettartama 100 év, a következő:*

C30/37 AC50(H) – D2,6 – barit – XC4 – 24 – F3 – 100 év – MSZ 4798 [4M]

MSZ 4798:2016/2M:2018

23.5. *A 136. oldalon a (8) bekezdést a következőre kell kicserélni:*

„(8) A 100 év tervezési élettartamú, legalább C20/25 nyomószilárdsági osztályú betonok [2M], beleértve a nagyszilárdságú betonok (≥ C55/67) nyomószilárdsági osztályát a P melléklet szerint ajánlott meghatározni. [2M]

MSZ 4798:2016/1M:2017 SZABVÁNY 5.3.2. SZAKASZA ALATTI 3. MEGJEGYZÉS

Rövidebb (például 20 év) vagy hosszabb (például 100 év) tervezési élettartam esetén kevésbé szigorú vagy szigorúbb követelményekre lehet szükség. Útmutató a „használati élettartam vége" értelmezésére és a felhasználás helyén érvényes előírásokban megadott betonösszetételek határértékeinek érvényességére az ISO 16204 szabványban található.

MSZ 4798:2016/1M:2017 SZABVÁNY F MELLÉKLET (2) BEKEZDÉSE

A beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezet (szerző megjegyzése: használati) élettartama a tervezéstől, a betonjellemzőktől és a kivitelezéstől függ. Az F1. táblázat értékei azon a feltételezésen alapulnak, hogy a szerkezet tervezett élettartama legalább 50 év; azonban lehetséges a beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezet rövidebb (például 20 év) vagy hosszabb (például 100 év) élettartartamra való tervezési is. A NAD F1. táblázat értékei azon a feltételezésen alapulnak, hogy a szerkezet tervezett élettartama 50 év.

MSZ 4798:2016 SZABVÁNY 5.5.5. FAGYÁLLÓSÁG

(4) A fagyasztási-olvasztási ciklusok előírt száma a vizsgálati módszertől függetlenül 50 év tervezési élettartam esetén n = 56, 100 év tervezési élettartam esetén n = 84.

(11) Az érdekelt felek abban is megegyezhetnek, hogy a beton próbatesteken az ultrahangimpulzus áthaladási idejét is megmérik – például az MSZ CEN/TR 15177:2009 európai műszaki jelentés 9. fejezete szerinti CIF-vizsgálattal – a fagyállósági vizsgálat előtt és ionmentes vízben vagy 3%-os NaCl-oldatban való n = 56 ciklusos fagyasztás után (50 év tervezési élettartam) vagy n = 84 ciklusos fagyasztás után (100 év tervezési élettartam), majd az ezekből kiszámítható relatív dinamikai rugalmassági modulusból ($RDM_{UPTT,n}$) következtetnek a beton fagy-, illetve fagy- és olvasztósó-állóságára. CIF-vizsgálat esetén az XF1

környezeti osztályban $RDM_{UPTT,n} \geq 70\%$, az XF2, XF2(H), XF3 és XF3(H) környezeti osztályban $RDM_{UPTT,n} \geq 80\%$, az XF4 és XF4(H) környezeti osztályban $RDM_{UPTT,n} \geq 90\%$ relatív dinamikai rugalmassági modulus tekinthető követelménynek.

MSZ 4798:2016 SZABVÁNY 11. A TERVEZETT BETON *ÉS AZ ELŐÍRT ÖSSZETÉTELŰ BETON* MEGJELÖLÉSE

4. példa: *Annak a C40/50 nyomószilárdsági osztályú (szokványos) betonnak a megjelölése, amelyből esőtől védett helyen álló feszített vasbeton gerenda készül (környezeti osztály: XC3), névleges legnagyobb szemnagysága D_{max} = 24 mm, konzisztenciája képlékeny és terülési mértéke 420–480 mm közé esik, konzisztenciaosztálya F3, megengedett kloridtartalma a cement tömegszázalékában kifejezve 0,10 tömegszázalék, CEM I 52,5 szilárdsági osztályú portlandcementtel készül, használati élettartama* (helyesen: tervezési élettartama) *100 év, a következő:*

C40/50 – XC3 – 24 – F3 – Cl 0,10 – CEM I 52,5 – 100 év – MSZ 4798

vagy

C40/50 – XC3 – 24 – F3 (450±30 mm) – Cl 0,10 – CEM I 52,5 – 100 év – MSZ 4798

5. példa: *Annak a C35/45 nyomószilárdsági osztályú (szokványos) betonnak a megjelölése, amelyből ipari szennyvíz ülepítőmedencéje készül (környezeti osztálya XC4, XD2, XA5(H) és XV2(H)), névleges legnagyobb szemnagysága D_{max} = 32 mm, konzisztenciája erősen képlékeny és terülési mértéke 490–550 mm közé esik, konzisztenciaosztálya F4, CEM I 42,5 N–SR 0 fajtájú szulfátálló portlandcementtel és metakaolin kiegészítőanyaggal készül, tervezési élettartama 100 év, a következő:*

C35/45 – XC4 – XD2 – XA5(H) – XV2(H) – 32 – F4 – CEM I 42,5 N -SR 0 – metakaolin – 100 év – MSZ 4798

vagy

C35/45 – XC4 – XD2– XA5(H) – XV2(H) – 32 – F4 (520 ± 30 mm) – CEM I 42,5 N–SR 0 – metakaolin – 100 év – MSZ 4798

MSZ 4798:2016 SZABVÁNY F MELLÉKLET (ELŐÍRÁS) A BETONÖSSZETÉTEL HATÁRÉRTÉKEI

(7) 100 év tervezési élettartamú betonok esetén a megengedett víz/cement, illetve víz/kötőanyag tényező az F1. táblázatban javasolt értéknél, ha az 0,50 vagy annál nagyobb, akkor 10%-kal (például 0,50 helyett 0,45), ha az 0,50-nál kisebb és eléri a 0,40 értéket, akkor 5%-kal kisebb (például 0,40 helyett 0,38).

(8) A 100 év tervezési élettartamú, legalább C20/25 nyomószilárdsági osztályú betonok nyomószilárdsági osztályát a 8.2.1.3. szakasz szerint, a 100 év tervezési élettartamú betonokra előírtak szerint kell meghatározni.

Előfeszített vasbeton szerkezetek készítéséhez az MSZ EN *13369 szabvány szerint legalább C30/37 nyomószilárdsági osztályú betont kell használni.*

(9)… 100 év tervezési élettartamú beton esetén a friss beton tervezett levegőtartalma (légpórustartalma) a NAD F2. táblázatban szereplő értéknél – ha az 1,5 térfogatszázalék vagy nagyobb – 20%-kal kisebb (például 2,0 térfogatszázalék helyett 1,6 térfogatszázalék) legyen. Ha a 100 év tervezési élettartamú beton feszített vasbeton, akkor a friss beton tervezett levegőtartalma (légpórustartalma) a NAD F2. táblázatban szereplő értéknél – ha az 1,5 térfogatszázalék vagy nagyobb – 30%-kal kisebb (például 2,0 térfogatszázalék helyett 1,4 térfogatszázalék) legyen.

MSZ 4798:2016 SZABVÁNY *N MELLÉKLET* (*TÁJÉKOZTATÁS*) *BETONFEDÉS*

(9) Ha a beton tervezési élettartama 100 év és a minőség-ellenőrzés nem kiemelt szintű, akkor az S4 szerkezeti osztályhoz képest a legkisebb betonfedést ($c_{min,dur}$) 10 mm-rel meg kell növelni. Az ilyen beton az MSZ EN 1992- 1-1 szabvány szerint S6 szerkezeti osztályú.

(10) Ha a beton tervezési élettartama 100 év és a minőség-ellenőrzés kiemelt szintű, akkor az S4 szerkezeti osztályhoz képest a legkisebb betonfedést ($c_{min,dur}$) 5 mm-rel meg kell növelni. Az ilyen beton az MSZ EN 1992-1-1 szabvány szerint S5 szerkezeti osztályú.

MSZ 4798:2016 SZABVÁNY *P MELLÉKLET* (*TÁJÉKOZTATÁS*) *A NYOMÓSZILÁRDSÁG ÉRTÉKELÉSE 50% ELFOGADÁSI VALÓSZÍNŰSÉG MELLETT*

P1. Általános tájékoztatás

E melléklet alkalmazása általában, de különösképpen a nagy szilárdságú betonok (≥ C55/67) és a 100 év tervezési élettartamú betonok nyomószilárdsági osztályának meghatározásához ajánlatos. Ha a beton nyomószilárdsági osztályát e melléklet szerint határozzák meg, akkor a beton jelében fel kell tüntetni az AC_{50}(H) jelet.

Az MSZ4798:2016 szabvány P mellékletében a 100 év tervezési élettartamú betonok nyomószilárdságának jellemző (karekterisztikus) értékét, illetve nyomószilárdsági osztályát a szabvány P melléklete szerint a *Student*-tényező, illetve az 50%-os elfogadási valószínűség elve alkalmazásával javasolják meghatározni.

P2.2.5. Példák a beton megjelölésére

1. példa: Annak a C40/50 nyomószilárdsági osztályú (szokványos) betonnak a megjelölése, amelynek nyomószilárdsági osztályát e melléklet szerint értékelték, és amelyből esőtől védett helyen álló feszített vasbeton gerenda készül (környezeti osztály: XC3), névleges legnagyobb szemnagysága D_{max} = 24 mm, konzisztenciája képlékeny és terülési mértéke 420–480 mm közé esik, konzisztenciaosztálya F3, megengedett kloridtartalma a cement tömegére vonatkoztatva és százalékban kifejezve 0,10 tömegszázalék, CEM I 52,5 szilárdsági osztályú portlandcementtel készül, használati élettartama (helyesen: tervezési élettartama) *100 év, a következő:*

C40/50 – AC_{50}(H) – XC3 – 24 – F3 – Cl 0,10 – CEM I 52,5 – 100 év – MSZ 4798

vagy

C40/50 – AC_{50}(H) – XC3 – 24 – F3 (450±30 mm) – Cl 0,10 – CEM I 52,5 – 100 év – MSZ 4798

2. példa. Annak a C35/45 nyomószilárdsági osztályú (szokványos) betonnak a megjelölése, amelynek nyomószilárdsági osztályát e melléklet szerint értékelték, és amelyből ipari szennyvizet ülepítő medence készül (környezeti osztálya XC4, XD2, XA5(H) és XV2(H)), névleges legnagyobb szemnagysága D_{max} = 32 mm, konzisztenciája erősen képlékeny és terülési mértéke 490–550 mm közé esik, konzisztenciaosztálya F4, CEM I 42,5 N–SR 0 fajtájú szulfátálló portlandcementtel és metakaolin kiegészítőanyaggal készül, tervezési élettartama 100 év, a következő:

C35/45 – AC_{50}(H) – XC4 – XD2 – XA5(H) – XV2(H) – 32 – F4 – CEM I 42,5 N - SR 0 – Metakaolin – 100 év – MSZ 4798

vagy

C35/45 – AC_{50}(H) – XC4 – XD2– XA5(H) – XV2(H) – 32 – F4 (520 ± 30 mm) – CEM I 42,5 N – SR 0 – Metakaolin – 100 év – MSZ 4798

Ultra nagy szilárdságú beton

Németül:	Ultrahochfester Beton (UHFB)
Angolul:	Ultra high strength concrete (UHSC)
Franciául:	Béton à ultra-hautes résistances en compression (BUHRC)

Ultra nagy szilárdságúnak nevezzük a betont, ha tapasztalati jellemző értéke legalább mintegy 10 %-kal nagyobb, mint az MSZ EN 206-1:2002, illetve az MSZ 4798-1:2004 szabvány szerinti C100/115 nyomószilárdsági osztályú közönséges beton és nehézbeton, vagy LC80/88 nyomószilárdsági osztályú könnyűbeton nyomószilárdságának előírt jellemző értéke. Átlagos nyomószilárdsága általában legalább 150 N/mm^2, és elérheti a 250, esetleg 300 N/mm^2 értéket. Az ultra nagy szilárdságú beton a nagyszilárdságú beton (C55/67 – C100/115, illetve LC55/60 – LC80/88) továbbfejlesztése, ezért tulajdonságai – amelyeket napjainkban is átfogóan kutatnak – sokban hasonlítanak a nagyszilárdságú beton ❖ tulajdonságaihoz.

Ultra nagy szilárdságú beton története

Ultra nagy, mintegy 200 N/mm^2 nyomószilárdságú betont először több mint 25 évvel ezelőtt a dán *Densit ApS* gyártott, például ipari padlók, repülőtéri pályák, benzinkutak, olaj és gáz szállítóberendezések, legutóbb szélerőművek alapteste stb. építése céljából, *Ducorit*® néven. Az utóbbi 15 évben Franciaországban kifejlesztett szálerősítésű ultra nagy szilárdságú betonnak (UHLFB: Ultrahochleistung Faserbeton) két változata van; az egyik a 0,6 mm legnagyobb szemnagyságú finombeton (a *Lafarge*, *Bouygues* és *Rhodia* cégek közös fejlesztése *Ductal*® néven), a másik a 6-8 mm legnagyobb szemnagyságú beton (az *Eiffage* cég fejlesztése BSI: Béton Spécial Industriel néven). Az utóbbi adalékanyagát nagyszilárdságú, zúzott, égetett bauxit képezi, amelyet CEM I típusú cementtel és szilikaporral összekeverve, *BSI*®/*Ceracem*-Premix néven gyárt és szállít az *Eiffage* és a *Sika* cég.

A híres sherbrooki (Kanada) híd 1989-ben épült, amelyet Franciaországban, Koreában és Japánban több is követett. A sherbrooki gyalogos híd pályalemeze és alsó öve C200 nyomószilárdsági osztályú betonból készült. A 60 m fesztávolságú híd hat előregyártott elemből áll, amelyeket utólag összefeszítettek.

Németországban ultra nagy szilárdságú, szálerősítésű betonból hidakat először 2004-ben Kassel környékén építettek a Kasseli Egyetem fejlesztése alapján (*1. és 2. ábra*). A zúzott kvarchomok legnagyobb szemnagysága 0,5 mm, a cement-tartalom 733 kg/m^3, a szilikapor-tartalom 230 kg/m^3, a víz-cement tényező 0,24, a víz-kötőanyag tényező 0,20, a víz-finomrész tényező 0,19 volt. (Finomrész alatt az összes 0,125 mm-nél finomabb szem értendő.) Az acélszál-tartalom 78 kg/m^3 (1,0 térfogat%), a folyósító adalékszer-tartalom 28,6 kg/m^3 volt. A fóliával letakart friss előregyártott elemeket 5 napon át 70 °C hőmérsékleten hőkezelték. A beton vizsgálata során 650±30 mm terülést, Ø150·300 mm méretű próbahengereken 185 N/mm^2 átlagos nyomószilárdságot, 150·150·700 mm méretű próbahasábokon 18 N/mm^2 átlagos hajlító-húzószilárdságot és 7 N/mm^2 átlagos közvetlen húzószilárdságot mértek.

1. ábra: Gyalogos és kerékpáros híd a Nieste folyó felett, Kasselben, ultra nagy szilárdságú előregyártott feszített vasbetonelemből. Fesztávolság: 12 m, lemezvastagság: 10 cm, szegélymagasság: 40 cm. A 12 tonnás elemet autódaruval emelték a helyére.
Forrás: *Schmidt, M. – Fehling, E.*, 2006

2. ábra: A Fulda folyó felett átívelő, 140 m hosszú Gärtner téri híd Kasselben, ultra nagy szilárdságú, szálerősítésű betonból készített, keresztirányban előfeszített, 5 m széles és 8,5 cm vastag pályalemezzel, és a pályalemezt alátámasztó, hosszirányban utófeszített övvel.
Forrás: *Schmidt, M. – Fehling, E.*, 2006

Az ausztriai Kärntner megyében, Völkermarkt községben 2008. júniusában kezdtek hozzá a világ leghosszabb, 157 m hosszú, részben ultra nagy szilárdságú betonból készülő, 14 m széles közúti hídjának építéséhez (*3. ábra*). A híd átadásának tervezett időpontja 2009 ősze. A C165/185 nyomószilárdsági osztályú, szálerősítésű, ultra nagy szilárdságú betonból a 70 m hosszú, 6 cm falvastagságú szekrénytartó-ívek készültek. (*Freytag, B. – Sparowitz, L.*, 2008)

3. ábra: Az ausztriai Völkermarktban, a Mühlgraben (Malomárok) felett, részben szálerősítésű ultra nagy szilárdságú betonból épült közúti híd
Forrás: http://www.arching.at

4. ábra: Az 1998-ban, Ductal® típusú ultra nagy szilárdságú finombetonból épült Peace-gyalogoshíd Szöulban. Fesztávolsága 120 m, magassága 15 m, pályalemeze 4,3 m széles és 3 cm vastag, keresztszelvénye 1,1 m magas. Forrás: http://87.230.81.56/imagineductal/home.php	**5. ábra:** Klinker siló ultra nagy szilárdságú betonból készült tetőpanele. USA, Illinois szövetségi állam, Joppa. Épült 2001-ben. Forrás: http://www.michigan.gov

Tömörség, tartósság, zsugorodás, repedés

Az ultra nagy szilárdságú betont a nagy szilárdság mellett a rendkívül tömör szövetszerkezet jellemzi. Mind összes porozitása, mind kapilláris porozitása (0,1 μm feletti átmérővel) nagyon csekély. Ezáltal a transzport folyamatok a közönséges és a nagyszilárdságú betonhoz képest nagyon lassúak, és a repedés nélküli ultra nagy szilárdságú beton nagyon tartós. Tartósságára utaló módon megnevezésére szinonimaként az „ultra nagy teljesítőképességű beton" (angolul: „Ultra High Performance Concrete", röviden: UHPC) kifejezést is használják.

A karbonátosodás előrehaladása egy év alatt kisebb, mint 0,1 mm, ezért – szemben a nagy szilárdságú betonokkal – az ultra nagy szilárdságú betonok esetén mérlegelhető az egyébként előírt betonfedések csökkentése. Káros anyag és a víz csak a kapillárisokon keresztül képes említésre méltó mértékben a beton belsejébe hatolni, ezért az ultra nagy szilárdságú beton az erős kémiai hatásoknak is ellenáll, és légbuborékok nélkül is igen fagy- és olvasztósó-álló. Az ultra nagy szilárdságú beton alkáli reakciójára (alkálifém-oxid – szilikát reakciójára) utaló jeleket eddig nem tapasztaltak.

A fiatal ultra nagy szilárdságú beton a kémiai átalakulás folytán zsugorodhat vagy duzzadhat, a hidratációs hő távozása és a kiszáradás következtében zsugorodhat ❖. Ezeket összefoglaló néven külső hatások nélküli, ún. autógén alakváltozásoknak hívják (*Fontana, P.* 2007). A kiszáradás (önkiszáradás) részben a hidratáció során lekötött víz felhasználásának, részben a pórusok relatív nedvesség-tartalma csökkenésének következménye. A vízhiány belső kiszáradáshoz vezet, amelyet külső térfogat csökkenés kísér. A teljesen vagy részben kiszáradt pórusokban olyan nagy nyomáscsökkenés lép fel, hogy a cementkő összehúzódik. A száradási zsugorodás csökkenő víz-cement tényező mellett rendszerint növekszik. A száradási zsugorodást a víz alatt tárolt és vízzel telített fiatal cementkő duzzadása csökkentheti. Miközben a fiatal beton felület-közeli kiszáradását megfelelő utókezeléssel általában meg lehet akadályozni, addig a fiatal ultra nagy szilárdságú beton zsugorodására a nagy cement-tartalom és a kis víz-cement tényező folytán a kémiai átalakulás és a hidratációs hő távozása a mértékadó. Az ultra nagy szilárdságú beton esetén jelentős a kiszáradás nélkül zajló kémiai (autogén) zsugorodás {lásd hidratáció ❖}, amely például 0,13 víz-kötőanyag

tényező esetén a beton 28 napos korában a 0,2 mm/m értéket is megközelítheti. Hasonló jelentősége van hidratációs hőfejlődésnek, amelynek hatására 350 – 400 kg/m^3 cement-tartalom esetén a kezdetben 20 °C hőmérsékletű friss beton a megengedett felső korlátnak tekinthető 70 °C hőmérsékletre is felmelegedhet. A beton hűlése közben a keresztmetszeti hőmérséklet-gradiens sajátfeszültségeket ébreszt, amelyek felület közeli repedéseket hozhatnak létre. A hidratációs felmelegedés kis víz-kötőanyag tényezővel, illetve kis hőfejlesztésű cement alkalmazásával csökkenthető.

Ha a zsugorodást valami akadályozza (például az adalékanyag, a zsaluzat, az illeszkedő építőelem stb.), akkor a fiatal betonban gátolt alakváltozásból eredő feszültségek ébrednek, amelyek repedéseket okozhatnak. A gátolt alakváltozásból eredő feszültségek a fiatal ultra nagy szilárdságú beton nagy ernyedési képessége következtében az első napokban csökkennek, majd növekszenek, és a beton esetleg megreped. Végérvényesen még nem tisztázták, hogy a repedésképződés az ultra nagy szilárdságú beton tartósságát csökkenti-e. Ha a nagyon vékony repedéseken keresztül víz hatol az ultra nagy szilárdságú beton szövetszerkezetébe, akkor kedvező esetben az utólagos hidratáció folytán a *repedések öngyógyulása* következik be. Kedvezőtlen feltételek mellett különböző károsodási folyamatok léphetnek fel, mint esetleg a másodlagos ettringit képződés vagy az alkáli szilikát reakció. Mind a két reakció betonkárosító duzzadási nyomásokat ébreszthet, és ezzel a beton tartósságát csökkentheti.

Az ultra nagy szilárdságú beton nagy tömörsége a tűzállóság szempontjából kedvezőtlen, mert a szabad és fizikailag kötött vízből képződő gőz távozása nehezebb, mint a kevésbé tömör közönséges vagy a nagyszilárdságú betonból. Nagy vízgőznyomás alakul ki, ami robbanásszerű lepattogzásokhoz vezet.

Az ultra nagy szilárdságú beton alapanyaga az adalékanyag, a kőliszt, a cement, a szilikapor, a folyósító adalékszer és a víz, esetleg a pernye, metakaolin, finom kohósalak őrlemény és az erősítő szál.

Adalékanyag

Ultra nagy szilárdságú betont finom vagy durva legnagyobb szemnagyságú adalékanyaggal lehet készíteni. A beton rendkívül kis ekvivalens víz-cement tényezőjére (víz-kötőanyag tényezőjére) és nagyon nagy nyomószilárdságára tekintettel az adalékanyag legfontosabb tulajdonsága a szemmegoszlás, a szemalak, a mechanikai, ásványtani tulajdonságok, az adalékanyag és cement közötti kémiai-fizikai kölcsönhatás, a kis keverési vízigény. Az adalékanyag szemmegoszlását úgy kell megtervezni, hogy a keverék tömörsége a lehető legnagyobb legyen. Az adalékanyag egyébként általában elégítse ki az MSZ EN 12620:2002+A1:2008 szabvány követelményét, Magyarországon az MSZ 4798-1:2004 szabvány figyelembevételével.

Bár korábban nem volt szokás, durva adalékanyaggal is lehet 150 N/mm^2-t messze meghaladó nyomószilárdságokat elérni. A *durva adalékanyaggal* készült ultra nagy szilárdságú beton adalékanyagának legnagyobb szemnagysága > 1 mm, általában 8 vagy 16 mm. Megnevezése német nyelvterületen „grobkörniger UHFB”. Tapasztalatok szerint a durva adalékanyagú ultra nagy szilárdságú beton esetén is tömörek a fázishatárok, és hátrányos mikro-repedéseket nem tartalmaz. A szemalak zömök legyen. Míg az adalékanyag rugalmassági modulusának és a cementkő rugalmassági modulusának hányadosa közönséges és nagyszilárdságú beton esetén mintegy 3, addig ultra nagy szilárdságú beton esetén ne legyen több, mint 1,0-1,4.

Az eredetileg *finom adalékanyaggal* készült ultra nagy szilárdságú betont angolul „Reactive Powder Concrete”-nak (röviden: RPC), franciául „Béton de Poudres Réactives”-nek (röviden: BPR) nevezik, német megnevezése „feinkörniger UHFB” vagy „Reaktionspulverbeton”. Adalékanyagának legnagyobb szemnagysága ≤ 1 mm, általában legfeljebb 0,5 mm, és ennek ellenére „beton”-nak tartják.

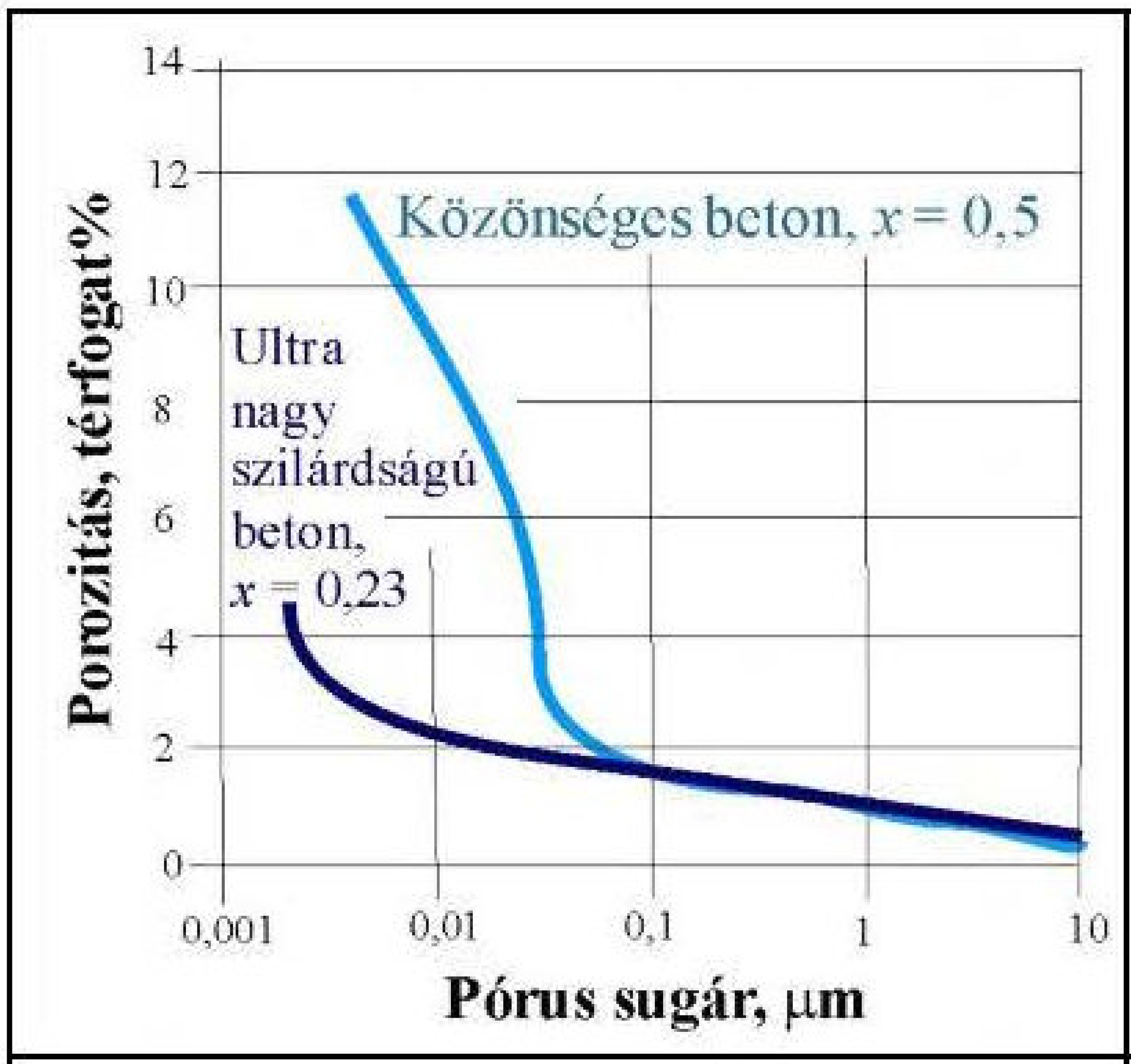
A *finom adalékanyagú* ultra nagy szilárdságú beton finom szemeinek (< 0,125 mm) mennyisége általában több mint 1000 kg/m^3 (kb. 350 – 400 liter/m^3). A finom szem-tartalmat úgy kell összeállítani, hogy a finom beton tömörsége a lehető legnagyobb, porozitása a lehető legkisebb legyen. Ennek hátterében az áll, hogy a finom szemek (szemnagysága > 1 μm, *Blaine*-féle fajlagos felülete mintegy 3600 cm^2/g) hézagait kitöltő még finomabb szemek (szemnagysága < 1 μm, *Blaine*-féle fajlagos felülete mintegy 18000 cm^2/g) mennyiségét növelve egy adott részarányig a szemhalmaz tömörsége növekszik, majd e részarány fölött csökken, miközben a habarcs viszkozitása eleinte csökken (jobban folyik), majd növekszik (kevésbé folyik). Ismert, hogy zömök alakú (ideális esetben gömb alakú) szemek esetén a legjobb térkitöltést a *Fuller*-parabola ❖ adja. Az optimumot megkeresve a finom szemhalmaz hézagainak kitöltéséhez – a szemek felületét nedvesítő vízrétegtől elvonatkoztatva – kevés víz is elegendő. A szemalakra, illetve a kis keverési vízigényre való tekintettel az ultra nagy szilárdságú *finom* beton adalékanyaga általában kedvező szemalakú homok, bár újabban homok és zúzottkő, például bazalt őrleménnyel is készítettek ultra nagy szilárdságú betont.

Az 1 μm alatti finom szemek célirányos adagolásával azonban általában nem csak az 1 μm feletti finom szemek hézagtérfogata és ezáltal vízigénye csökken, hanem a finom szem keverék belső fajlagos felülete is megnövekszik. Ha az 1 μm feletti finom szemekhez a szükségesnél több 1 μm alatti finom szemet adunk, vagy a finom szem igen finom és belső fajlagos felülete igen nagy – mint például a szilikapor ❖ esetén –, akkor esetleg több vízre van szükség a szemek felületének nedvesítéséhez és az igen finom szemek hézagtérfogat növekményének kitöltéséhez, mint amennyi a teherhordó szemcseváz szerkezetéhez tartozna, és a kelleténél több igen finom szem miatt is romlik a szemek közötti teherátadás. Ezért az 1 μm alatti igen finom szemek mennyiségét és a vízigényt korlátozni kell.

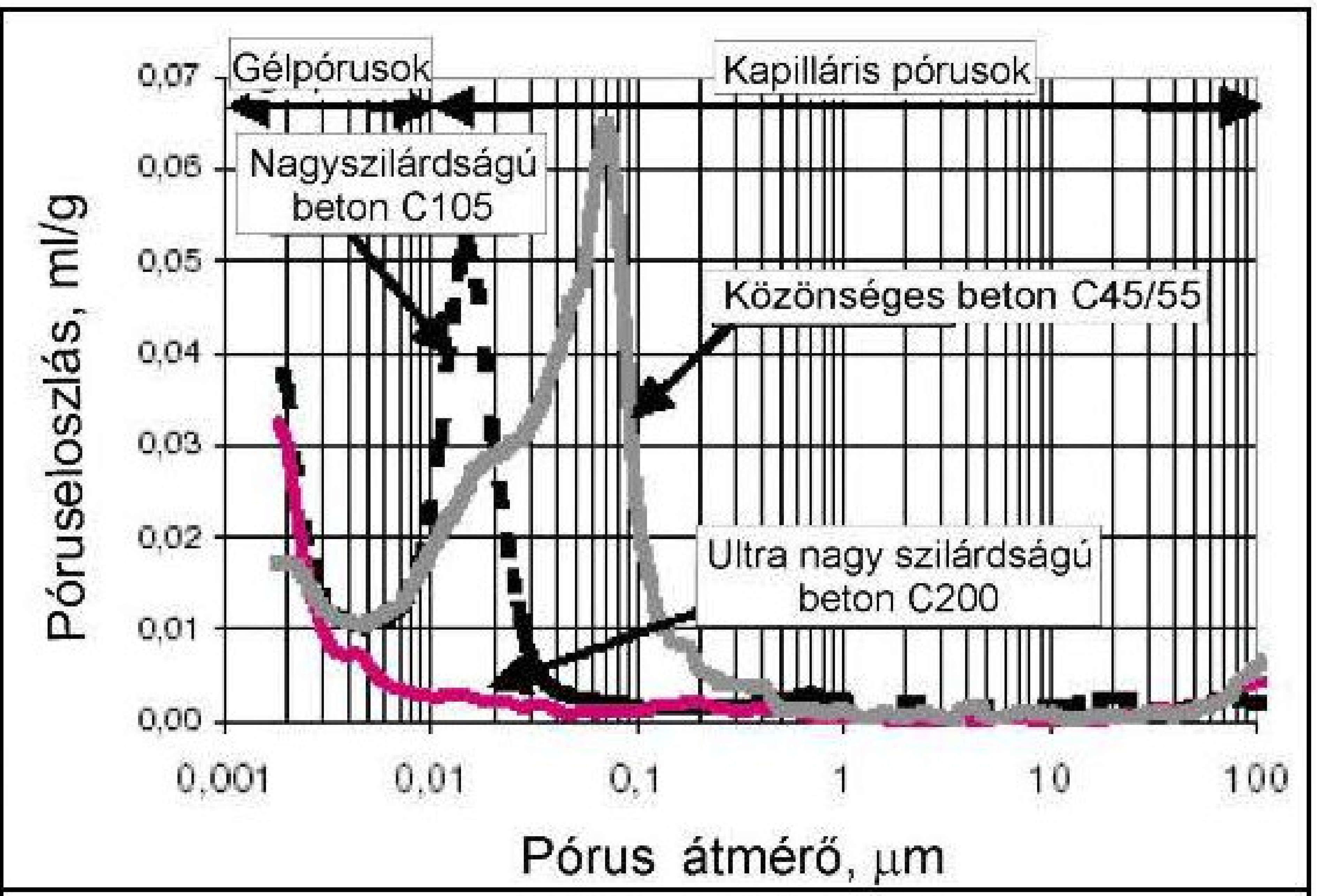
Cement

Az ultra nagy szilárdságú beton cement-tartalma általában 600 – 1000 kg/m^3, tehát a nagyon kis víz-kötőanyag tényező (nevezik módosított víz-cement tényezőnek, ekvivalens víz-cement tényezőnek, víz-cement tényező egyenértéknek is) miatt sokkal több, mint a közönséges (normál) vagy a nagyszilárdságú betoné. Ha az ultra nagy szilárdságú beton nagyon tömör, akkor 500 kg/m^3-nél kisebb cement-tartalommal is elkészíthető.

A cementkő szükséges tömörségére követelmény érték nem ismert, de az irodalomban találhatók higanypenetrációval (higany-poroziméterrel) felvett diagramok, amelyek a különböző szilárdságú betonok cementköve porozitásának különbségét mutatják be (*6. – 7. ábra*). Ezek szerint az ábrák szerint a 0,1, illetve a 0,01 μm-nél kisebb pórusok tartományában jelentkezik a nagy porozitás különbség. Kutatóktól függ, hogy a 0,1 μm pórusnagyságot a makro-gélpórusok és a mikro-kapilláris pórusok határának, vagy a mikro-kapillárisok tartományába eső értéknek tekintik.



6. ábra: A közönséges és az ultra nagy szilárdságú beton cementköve porozitásának összehasonlítása. Forrás: VDZ: Zement-Taschenbuch. Verlag Bau+Technik 2008



7. ábra: A közönséges, a nagyszilárdságú és az ultra nagy szilárdságú beton cementköve póruseloszlásának összehasonlítása. Forrás: *Schmidt, M. – Fehling, E.*, 2006

Kísérletek szerint előnyös, ha az ultra nagy szilárdságú beton trikalcium-aluminát (C_3A) szegény vagy mentes (szulfátálló), nem túl finomra őrölt portlandcementtel készül {lásd nagyszilárdságú beton ◄}. A nagyon finomra őrölt cement nagy vízigénye kedvezőtlen, ezért a 3000 – 4500 cm^2/g fajlagos felületű cement alkalmazását ajánlják. A cement átlagos nyomószilárdsága 54 – 64 N/mm^2 közé essék, azaz 42,5 vagy 52,5 nyomószilárdsági osztályú legyen. Általában CEM I típusú cementet alkalmaznak, de például Németországban CEM III/B 42,5 NW/HS jelű kis hőfejlesztésű, szulfátálló kohósalakcementtel, 12 tömeg% szilikapor-tartalom és $x = 0{,}2$ víz-cement tényező mellett, 20 °C hőmérsékleten tárolt beton próbatesteken, 28 napos korban 160 N/mm^2 beton nyomószilárdságot értek el (*Schmidt* et al., 2008).

Kiegészítőanyag

A nagy vagy ultra nagy szilárdságú beton szükséges tömörségét legkönnyebben II. típusú (rejtett hidraulikus tulajdonságú) kiegészítőanyag (szilikapor, metakaolin stb., lásd nagyszilárdságú beton és szilikapor ❖) adagolásával lehet elérni.

A szilikapor aktivitása folytán a cementkő részének tekintendő. Adagolása a cement-tartalomra vetített 10 – 25 tömeg% között mozog, bár a beton lúgosságát csökkenti, ezért 11 tömeg%-nál nagyobb adagolása nem ajánlott.

Az amorf metakaolin a cement hidratációja során keletkező kalcium-hidroxiddal (portlandittal) másodlagos kalcium-szilikát-hidrát fázist képez, miáltal a beton nyomószilárdsága csak kevéssé tér el a szilikapor-tartalmú ultra nagy szilárdságú beton szilárdságától.

A pernye bár rejtett hidraulikus tulajdonságú, II. típusú kiegészítőanyag, az ultra nagy szilárdságú betonban inkább csak a mészkőlisztéhez hasonlóan töltőanyag szerepét tölti be.

A kőliszt inert, I. típusú kiegészítőanyag, amely a cementtel nem lép reakcióba, ezért általában töltőanyagként alkalmazzák. A kőliszt a hőkezelt ultra nagy szilárdságú betonban azonban a töltőanyag hatás mellett mégis hozzájárul a szilárdsághoz, mert kristályosodási csíra szerepét is betölti, leghatékonyabban akkor, ha szemnagysága 5 – 25 μm közé esik. Például a (kvarcliszt + szilikapor)/cement arány mintegy 0,62 legyen. Kvarcliszt adagolással kedvező tömörség esetén a nyomószilárdság akár 20 %-kal is megnőhet az ekvivalens víz-cement tényező csökkentése nélkül. Más megfogalmazásban, azonos nyomószilárdság és

ekvivalens víz-cement tényező mellett a kvarcliszt adagolással a cementnek mintegy 20 %-a megtakarítható.

Víz, víz-cement tényező

Az ultra nagy szilárdságú beton a kis *víz-cement tényező* ❖ ellenére jól folyósítható, szétosztályozódási és kivérzési hajlama csekély.

A beton nagy szilárdsága és tömörsége nagyrészt a csekély *víz-kötőanyag tényezőnek* (ekvivalens víz-cement tényezőnek) ❖ köszönhető. A nagy teljesítőképességű, nagy vagy ultra nagy szilárdságú betonok általában 0,25-0,30 alatti, sokszor 0,2 körüli víz-kötőanyag tényezővel készülnek, és így ha csak utólag nem vesznek fel vizet, akkor teljes mértékben nem tudnak hidratálódni. A teljes hidratációhoz – ha minden feltétel rendelkezésre áll – akár 10-100 évre is szükség van.

A víz-kötőanyag tényező optimumát a megszilárdult beton kizsaluzáskori testsűrűsége (ρ_0) és a szemhalmaz anyagsűrűsége (ρ_s) hányadosa ($k_{rel} = \rho_0 / \rho_s$) függvényében keresik. Kísérleti eredmények szerint a k_{rel} hányados akkor éri el a legnagyobb értéket ($k_{rel, max} = 0,87$), ha a víz-kötőanyag tényező értéke 0,13 – 0,15 közé esik, mert ekkor a legkisebb beton levegő-tartalma. Újabb kutatások rámutatnak, hogy egyéb tényezők hatása folytán nagyobb víz-kötőanyag tényező mellett is lehet ultra nagy szilárdságú betont készíteni (*Schmidt* et al., 2008).

Az ultra nagy szilárdságú beton tömörségére nagy hatással van a finomanyag keverék hézagtérfogata, amelynek megítélésére bevezették a *víz-finomrész tényezőt*. A víz-finomrész tényező a víz és a 0,125 mm alatti szemek (cement és az összes egyéb 125 μm alatti finom szem) térfogatának $V_{víz}/V_{finomrész}$ vagy tömegének $M_{víz}/M_{finomrész}$ hányadosa. A legtömörebb térkitöltéshez tartozó optimális szemmegoszlást és finom szem-tartalmat számítással vagy kísérlettel lehet meghatározni, de a számítási módszerek csak közelítő eredményre vezetnek, mert ma még a valós eredményre vezető numerikus és anyagtani modellek (pl. a szemalak, a felületi érdesség stb. leírása) hiányoznak. A kísérletek hézagtérfogat és viszkozitás mérésből állnak. Például azonos víz-cement tényező, nagy szilikapor adagolás, kis tömörség és $V_{víz}/V_{finomrész} = 0,51$ hányados mellett 500 mm terülést és 155 N/mm^2 nyomószilárdságot, kisebb szilikapor adagolás, nagyobb tömörség és $V_{víz}/V_{finomrész} = 0,44$ hányados mellett 650 mm terülést és 195 N/mm^2 nyomószilárdságot mértek.

Adalékszer, folyósítószer

A klasszikus betontechnológiát ❖ felváltó korszak kezdetén, amely a hatékony képlékenyítő és folyósító adalékszerek ❖ megjelenésének időszaka, a beton folyósítószerek jórészt lignin-szulfonát (LS), naftalin-formaldehid-szulfonát (SNF vagy NFS) vagy melamin-formaldehid-szulfonát (MFS vagy SMF) bázison készültek. Ezek hatása arra épült, hogy a még alig vagy kissé hidratálódott klinkerásványok, illetve első hidratációs termékek – különösen az ettringit – felületén adszorbeálódnak (lekötődnek), miáltal a klinkerásványok, illetve hidratációs termékek felületén elektrosztatikus taszítás jön létre, ami a friss beton folyós állapotának lényeges feltétele, és lehetővé teszi a víz-cement tényező csökkentését. E „kezdeti generációs" folyósítószerek vízcsökkentő hatása és hatásideje az ultra nagy szilárdságú betonok készítéséhez nem elegendő, erre a célra az ún. „új generációs" folyósító adalékszerek, mint a szulfonált-vinilkopolimer (poliakrilát, PA) bázisú és a polikarboxilát (PC), illetve továbbfejlesztett változata, a polikarboxilát-éter (PCE) bázisú szuper-folyósítószerek alkalmasak.

A szuper-folyósítószerekre, különösen a polikarboxilát-éter bázisú folyósítószerekre az jellemző, hogy alkalmazásukkal – szemben a „kezdeti generációs" folyósítószerekkel – a klinkerásványok közötti elektrosztatikus taszítóhatás némiképp háttérbe szorul, és elsődleges szerephez a molekulák közötti térbeli taszítás vagy távolságtartás (németül: sterischer Effekt, sterische Abstoßung, sterische Hinderung) jut. Általuk a vízmegtakarítás és a hatásidő megnő,

a cementpép igen kis víz-cement tényező mellett is tömörré válik, a csökkent adszorpció folytán – amely főképp a trikalcium-aluminátra összpontosul – a hidratáció zavartalanabb.

Szálerősítés

A szerkezet építésben az ultra nagy szilárdságú beton nagy szilárdságának kihasználásához nagy vashányad vagy előfeszítés alkalmazása szükséges. Gyakran acélszálakat vagy nagyszilárdságú műanyagszálakat (például poli-vinil-alkohol szálakat, PVA) kevernek a betonba, miáltal akár az 50 N/mm^2 hajlító-húzószilárdságot is el lehet érni. Ha vasalás nélkül, csak acélszálak kerülnek a betonba, akkor általában nagy száladagolásra van szükség. Finomszemű ultra nagy szilárdságú beton esetén az ajánlott acélszál adagolás 2,5 – 3,5 térfogat%, a szálhosszúság 8 – 16 mm, az átmérő 0,1 – 0,2 mm, a szálhosszúság és az adalékanyag legnagyobb szemnagyságának hányadosa 10 legyen. Az acélszál nem csak a teherbírás, illetve a szívósság szempontjából hasznos, hanem csökkenti a repedésképződést és a repedéstágasságot is. A korai zsugorodás mérséklése és a tűzállóság szempontjából kedvező a poli-propilén szál, amelyet 0,3 – 0,6 térfogat% mennyiségben adagolnak az ultra nagy szilárdságú betonba. Előnyös a vegyes száladagolás, így a különböző hosszúságú acélszálak, illetve az acél- és például a poli-akril-nitril szálak együttes alkalmazása. A száladagolás a konzisztenciát és a szétosztályozódási (ülepedési) hajlamot a víz-kötőanyag tényező függvényében befolyásolja, a bedolgozhatóságot megnehezíti.

Ultra nagy szilárdságú beton készítése

Az ultra nagy szilárdságú betonból készített szerkezeti elemek – így az ultra nagy szilárdságú betonból épített hidak túlnyomó többsége is – külföldön eddig leggyakrabban előregyártással készültek. A kis keresztmetszeti méretek különlegesen karcsú szerkezeteket eredményeznek. A nyomott elemek keresztmetszete is csökkenthető, illetve terhelése növelhető.

Az ultra nagy szilárdságú beton készítésére jelenleg még nincs előírás. A 150 N/mm^2 feletti ultra nagy szilárdságú beton készítésének módjával az irodalom részletesen foglalkozik (*Schmidt, M.* et al., 2008). A nagyszilárdságú betonok ❖ betontechnológiai intézkedéseinek következetes alkalmazása – a víz-cement tényező csökkentése, a szilikapor alkalmazása, a mikro tartományban a tömörség fokozása – lehetővé teszi a nyomószilárdság növelését mintegy 200 N/mm^2-ig.

Az ultra nagy szilárdságú beton összetételére példa az *1. táblázatban* látható.

1. táblázat: Példa az ultra nagy szilárdságú beton összetételére

Összetevők	Finomszemű	Durvaszemű
	ultra nagy szilárdságú beton összetétele, kg/m^3	
CEM I 52,5 szulfátálló portlandcement	800	580
Víz	170	150
Kvarchomok, legnagyobb szemnagyság 0,5 mm	1020	355
2/8 mm szemnagyságú bazalt zúzottkő	–	710
0,09 mm alatti kvarcliszt	220	130
Szilikapor	135	175
Acélszál	–	195
Folyósító adalékszer	25	30

Az ultra nagy szilárdságú beton készítésekor mindenekelőtt a száraz összetevőket kell megkeverni, majd ezután kell a folyékony összetevőket a keverődobba juttatni. Ügyelni kell a csomósodás nélküli keverésre. Ha a beton szálerősítésű, akkor a szálakat – a tökéletes elkeveredés érdekében – a folyósítószer hatásának megjelenése után kell a keverékhez adni, és alaposan bekeverni. Előnyös lehet, ha a betont két ütemben keverik meg, először 6 m/s, majd a második ütemben 1,4 m/s keverési sebességgel. A keverési folyamatba 1-2 perc

pihentetési idő is beiktatható. A teljes szükséges keverési idő 10-15 perc. Az erőteljes keverés hatására a keverék nagyon felmelegedhet, ez rontja a bedolgozhatóságot és lerövidíti a bedolgozási időt, ami ellen az összetevők hűtésével lehet védekezni.

A *vákuumban való keveréssel* csökkenthető a friss beton levegő-tartalma, ugyanakkor a vibrálással történő utólagos levegő eltávolítás az ultra nagy szilárdságú beton gyakran ragadós konzisztenciája miatt kevésbé hatásos. A vákuum akkora legyen, hogy 30 °C keverési hőmérséklet mellett a víz jelentősen még ne párologjon.

Az ultra nagy szilárdságú beton szivattyúzható. Szabad eséssel nem szabad a zsaluzatba juttatni.

A zsaluzat tömör és tömített kell legyen, és ellen kell álljon a nagy folyadék nyomásnak.

Ha a friss ultra nagy szilárdságú beton ragadós, tapadós konzisztenciájú, akkor a tömörítéshez az átlagosnál több energia szükséges. A kis levegő-tartalmú, öntömörödő konzisztenciájú betont alig kell tömöríteni. Ha a levegő-tartalom kihajtása a cél, akkor az kis frekvencián és kis amplitúdóval történjék. Ez utóbbi esetben a tömörítési idő általában hosszabb, mint a közönséges beton esetén. Előregyártó üzemben az ultra nagy szilárdságú betont külső vibrátorral, újabban tűvibrátorral is szokás tömöríteni. Helyszíni betonozás során a tömörítés a szokásos eszközökkel történhet.

A friss helyszíni ultra nagy szilárdságú beton felületének megmunkálása a friss beton ragadóssága miatt körülményesebb, utókezelése nagyobb körültekintést igényel, mint az előregyártott betoné. A sima felület kialakításához sokszor nem elegendő az egyszerű lehúzás, de bevált a kis frekvencián járatott könnyű vibropalló megfelelő időbeni alkalmazása: ha a friss beton még nem kötött eléggé meg, akkor a felület felszakad. Ha viszont a beton utókezelése nem megfelelő és a beton már megdermedt, akkor a felület már alig munkálható meg.

Ha a szabad felületet nem védjük meg a kiszáradástól és a napsugárzástól, akkor a felület a kis víz-tartalom és a nagy finomrész-tartalom folytán egyenetlen, ún. „elefántbőrös” lesz és korai, képlékeny vagy kapilláris zsugorodás is felléphet. Célravezető utókezelés a felület azonnali légmentes betakarása vagy állandó nedvesen tartása. Különösen előnyös, ha a fóliatakarás felhelyezése előtt a felületre utókezelőszert hordunk fel, mert ezáltal nemcsak az „elefántbőr” képződése, hanem a korai zsugorodásból származó felületi repedések keletkezése is megelőzhető.

Hőérleléssel vagy nyomás alatti szilárdítással a természetes érlelésnél nagyobb szilárdságokat lehet elérni.

A *hőérlelés* legszokásosabb módja szerint a betont egy-két napos pihentetés után 48 órán át, kiszáradásmentesen 70-90 °C hőmérsékletű levegőn tárolják, és így a cement hidratáció sebességét felgyorsítva a beton akár el is érheti a végszilárdságát. A 60 °C hőmérséklet feletti korai hőkezelés hatására a cement trikalcium-aluminát ásványa és a kötés-szabályozó kalciumszulfát (gipszkő) nem ettringitté (triszulfáttá) és monoszulfáttá {lásd cement hidratációja ❖}, hanem a kalcium-szilikát-hidrát kevésbé stabil változatává alakul, és a szabadon maradt szulfát később nedvesség jelenlétében káros, repesztő-hatású másodlagos ettringitet képezhet. Tapasztalatok szerint trikalcium-aluminát szegény cementtel készülő, igen tömör ultra nagy szilárdságú beton esetén ez a veszély nem áll fenn, ha a friss betont hőkezelés előtt egy napig környezeti hőmérsékleten pihentetik.

A 90 °C feletti hőmérsékleten való szilárdítással és a *nyomás alatti szilárdítással* eddig csak kevés tapasztalat van. (*Schmidt, M.* et al., 2008)

Felhasznált irodalom

MSZ 4798-1:2004	Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőség. Az MSZ EN 206-1 és alkalmazási feltételei Magyarországon
MSZ EN 206-1:2002	Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőség
MSZ EN 12620:2002+A1:2008	Kőanyaghalmazok (adalékanyagok) betonhoz
DIN 1045-2:2001	Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 2: Beton. Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
Fontana, P.:	Einfluss der Mischungszusammensetzung auf die frühen autogenen Verformungen der Bindemittelmatrix von Hochleistungsbetonen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb, Heft 570. Beuth Verlag GmbH., Berlin, 2007
Freytag, B. – Sparowitz, L.:	WILD-Brücke – UHPC in der Praxis als Ergebnis der Forschung. Forschung & Entwicklung für Zement und Beton. Kolloquium 2008. Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie. Kurzfassungen der Beiträge
Schmidt, M. – Fehling, E.:	Grundlagen der Betontechnologie von Hoch- und Ultrahochleistungsbeton und Anwendung von UHPC im Brückenbau. Der Tagungsband Seminar der Vereinigung der Straßenbau- und Verkehrsingenieure in Hessen e. V. am 05.04.2006. pp. 1-11.
Schmidt, M. et al.:	Ultrahochfester Beton. Sachstandbericht. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb, Heft 561. Beuth Verlag GmbH., Berlin, 2008
Zement-Taschenbuch	Verein Deutscher Zementwerke e. V. 51. Ausgabe. Verlag Bau+Technik GmbH., Düsseldorf, 2008.

Jelmagyarázat: ❖ A jel előtt álló fogalom a fogalomtár szócikke.

A cikk eredeti változata megjelent a	BETON szakmai havilap	2009. október havi számának 12-14. oldalán (1. rész) és a 2009. november-december havi számának 14-17. oldalán (2. rész)

VÍZZÁRÓ BETONOK

1. A VÍZZÁRÓ BETONOK KÖRNYEZETI OSZTÁLYAI

A beton a használati élettartam alatt akkor lesz *tartós*, ha a környezeti hatásokat károsodás nélkül viseli. Így a beton, vasbeton, feszített vasbeton szerkezetek építéséhez használt betonkeverékeknek rendeltetésük szerint illeszkedniük kell a környezeti hatásokat leíró környezeti osztályokhoz. A betonkeverékek rendeltetésük szerint akkor illeszkednek a környezeti hatásokat leíró környezeti osztályokhoz, ha összetételük megfelel az $x_{\max}$ megengedett legnagyobb víz-cement tényező, a c_{min} megkövetelt cementtartalom, a $Cf_{\mathrm{ck,cyl}}/f_{\mathrm{ck,cube,min}}$ megkövetelt beton nyomószilárdsági osztály, és a $\rho_{\mathrm{beton,friss,min}}$ megkövetelt legkisebb, friss állapotban mért beton testsűrűséget meghatározó $V_{\mathrm{L,max}}$ megengedett legnagyobb levegőtartalom határértékének. A vízzáró betonok környezeti osztályainak követelménye az *1. táblázatban* található.

1. táblázat: Környezeti osztályok követelményei

Alkalmazási terület	Környezeti osztály jele	Beton nyomó-szilárdsági osztálya, legalább	Beton cement-tartalma, legalább, kg/m^3	Beton víz-cement tényezője, legfeljebb	Friss beton levegő-tartalma, legfeljebb, térfogat%[1]
Vízzáró beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek					
vz 60 jelű vízzáró beton	XV1(H)	C25/30	300	0,60	1,0
	Például: Pincefal, csatornafal, mélyalap, áteresz, folyóka, surrantóelem, mederlap, mederburkolóelem, rézsűburkolat, legfeljebb 1 m magas víztároló medence, záportározó, esővízgyűjtő akna				
vz 40 jelű fokozottan vízzáró beton	XV2(H)	C30/37	300	0,55	1,0
	Például: Vízépítési szerkezetek, gátak, partfalak, 1 m-nél magasabb víztároló medence, föld alatti garázs, aluljáró külön szigetelőréteg nélkül, földalatti alaptestek, kiegyenlítő lemezek				
vz 20 jelű igen vízzáró beton	XV3(H)	C30/37	300	0,50	1,0
	Például: Mélygarázs, mélyraktár, alagút külön szigetelőréteg nélkül				

Az építési célnak - beleértve a tartósságot is - csak a kellően bedolgozott, megkövetelt tömörségű, zárványmentes beton felel meg, ezért a bedolgozott friss beton levegőtartalmát korlátozni kell. Magyarországon a közönséges friss beton bennmaradt levegőtartalmának (a levegőzárványoknak) tervezési értéke általában legfeljebb 2 térfogat%, a vízzáró betoné legfeljebb 1 térfogat%.

A friss beton levegőtartalmát vagy MSZ EN 12350-7:2000 szabvány szerint lehet megmérni, vagy a bedolgozott friss beton tényleges és tervezett testsűrűségének hányadosából, valamint az összetevők tervezett tömegéből és sűrűségéből, ill. testsűrűségéből lehet számítani.

Az 1 m^3 térfogatú bedolgozott friss beton tényleges levegőtartalma a friss beton tényleges és tervezett testsűrűsége, a beton tervezett cementtartalma, tervezett víz-cement tényezője, tervezett adalékanyag-tartalma, valamint a cement anyagsűrűsége és az adalékanyag testsűrűsége alapján – feltételezve, hogy a beton keverési aránya a tervezettnek megfelel – a következőképpen számítható ki:

[1] A friss beton levegőtartalma feszített vasbeton esetén legfeljebb 1,5 térfogat% lehet. Ha a beton újrahasznosított adalékanyaggal készül, akkor a levegőtartalom a táblázatban szereplő értékeknél 0,5 térfogat%-kal nagyobb lehet.

$$V_{L,test} = 1000 - \frac{\rho_{friss\ beton,\ test}}{\rho_{friss\ beton}} \cdot \left(\frac{1000 M_C}{\rho_C} + x \cdot M_C + \frac{1000 M_A}{\rho_A} \right) \quad [liter]$$

ahol:

$V_{L,test}$	=	a friss beton tényleges levegőtartalma, liter
$\rho_{friss\ beton,\ test}$	=	a friss beton tényleges testsűrűsége, kg/m³
$\rho_{friss\ beton}$	=	a friss beton tervezett testsűrűsége, kg/m³
M_C	=	a beton tervezett cementtartalma, kg/m³
x	=	a beton tervezett víz-cement tényezője
$M_V = x \cdot M_C$	=	a keverővíz tervezett tömege, kg/m³
M_A	=	a beton tervezett adalékanyag-tartalma, kg/m³
ρ_C	=	a cement anyagsűrűsége, kg/m³
ρ_A	=	az adalékanyag keverék szemeinek súlyozott testsűrűsége kiszárított állapotban, kg/m³:

$$\rho_A = \frac{1}{\left(\frac{\alpha}{\rho_\alpha} + \frac{\beta}{\rho_\beta} + \frac{\gamma}{\rho_\gamma} + \ldots \right)} \qquad [kg/m^3]$$

ahol:

$\alpha, \beta, \gamma \ldots$	=	az adalékanyag keveréket alkotó frakciók tömegaránya, 0 és 1 közé eső nevezetlen szám
$\rho_\alpha, \rho_\beta, \rho_\gamma \ldots$	=	az adalékanyag keveréket alkotó frakciók szemeinek átlagos testsűrűsége kiszárított állapotban, kg/m³

A ρ_A súlyozott testsűrűséget kell használni az adalékanyag keverékre akkor is, ha annak természetes adalékanyag frakciói különböző kőzetfajtájúak (például homok, kavics, mészkő, andezit vagy bazalt zúzottkő stb.).

Például az M_C = 300 kg/m³ tervezett cementtartalmú, x = 0,5 tervezett víz-cement tényezőjű, M_A = 1936 kg/m³ tervezett adalékanyag-tartalmú, bedolgozott állapotban $\rho_{\text{friss beton}}$ = 2386 kg/m³ tervezett és $\rho_{\text{friss beton, test}}$ = 2398 kg/m³ tényleges testsűrűségű friss beton tényleges levegőtartalma, ha a cement anyagsűrűsége ρ_C = 3100 kg/m³, és az adalékanyag keverék testsűrűsége ρ_A = 2640 kg/m³:

$$V_{L,\ test} = 1000 - \frac{2398}{2386} \cdot \left(\frac{1000 \cdot 300}{3100} + 0,5 \cdot 300 + \frac{1000 \cdot 1936}{2640} \right) =$$

$$= 1000 - 1,005 \cdot (96,77 - 150 - 733,33) = 15,0 \quad [liter]$$

$$V_{L,\ test}^{\%} = 100 \frac{V_{L,\ test}}{1000} = 1,5 \quad [térfogat\ \%]$$

ahol:

a cement által elfoglalt tervezett térfogat: V_C = 300/3,1 = 96,77 liter,

a víz által elfoglalt tervezett térfogat: V_V = 150 liter,

az adalékanyag által elfoglalt tervezett térfogat: V_A = 1936/2,64 = 733,23 liter,

a betonösszetevők által elfoglalt tervezett térfogat: $V_C + V_V + V_A$ = 980,1 liter,

a tervezett levegőtartalom V_L = 19,9 → 20 liter, azaz 2,0 térfogat%,

a betonösszetevők által ténylegesen elfoglalt térfogat:

$1{,}005 \cdot (V_C + V_V + V_A)$ = 984,9 liter,

a tényleges levegőtartalom: 15,1 → 15 liter, azaz 1,5 térfogat %,

összesen:

$$V_C + V_V + V_A + V_L = (\rho_{friss\ beton,\ test} / \rho_{friss\ beton}) \cdot (V_C + V_V + V_A) + V_{L,test} = 1000 \text{ liter},$$

a tényleges cementtartalom: $(\rho_{friss\ beton,\ test} / \rho_{friss\ beton}) \cdot V_C = 1{,}005 \cdot 300 = 301{,}5$ kg/m^3.

Ha a beton nyomószilárdságának ellenőrzésére készített *bedolgozott friss beton próbatestek átlagos testsűrűsége* a bennmaradt levegőtartalom (levegőzárványok) miatt a tervezett testsűrűségnél kisebb, akkor ezeket nem szabad a szilárd beton nyomószilárdsági követelményeinek az igazolásához felhasználni. Közönséges beton esetén *a bedolgozott friss beton próbatestek egyedi testsűrűségének* a tervezett testsűrűségnél legfeljebb 30 kg/m^3-rel szabad kisebbnek lennie. Minden 1 % testsűrűség hiány 10 liter/m^3 többletlevegőt, azaz a tervezetthez képest +1 térfogat% levegőzárványt jelent. Minden +1 térfogat% levegőtartalom 4-5 % nyomószilárdság csökkenést okoz, ezért a megfelelő betonösszetétel, konzisztencia és tömörítési módszer a betonkészítés alapvető követelménye. A nyomószilárdság vizsgálati, egy vagy több *megszilárdult beton próbatest alkotta minták testsűrűségének terjedelme ne legyen nagyobb átlaguk 3 %-ánál.* E feltételeknek meg nem felelő friss és megszilárdult beton próbatesteket a nyomószilárdság vizsgálati eredmények értékelésébe nem szabad bevonni.

Megjegyezzük, hogy a betont általában egyidejűleg több környezeti hatás éri, ilyenkor a környezeti hatás követelményét a környezeti osztályok kombinációjaként kell kifejezni. Például valamely esőnek és fagynak kitett, olvasztó sózás nélküli, agresszív talajvízzel érintkező vasbeton támfal légbuborékképző adalékékszer nélkül, szulfátálló cementtel készülő betonjának környezeti osztály csoportja: XC4, XF1, XA2, XV1(H) (*2. táblázat*).

2. táblázat: Példa a környezeti osztály csoport követelményére

Környezeti osztály jele	Beton nyomó-szilárdsági osztálya, legalább	Beton cement-tartalma, legalább, kg/m^3	Beton víz-cement tényezője, legfeljebb	Friss beton levegőtartalma, legfeljebb, térfogat%
XC4	**C30/37**	300	**0,5**	2
XF1	**C30/37**	300	0,55	2
XA2	**C30/37**	**320**	**0,5**	2
XV1(H)	C25/30	300	0,6	**1**
Mértékadó követelmény	***C30/37***	***320***	***0,5***	***1***

Az erőtani számítás eredménye alapján megállapított nyomószilárdsági osztály és a környezeti feltételek alapján megkövetelt legkisebb nyomószilárdsági osztály eltérő lehet. A kettő közül a nagyobb nyomószilárdsági osztályt kell mértékadónak tekinteni, és az ehhez tartozó víz-cement tényezőt, cementtartalmat, a megengedett levegőtartalom megszabta megkövetelt testsűrűséget kell a betongyártáshoz követelményként elfogadni. Ezek az elfogadott értékek elégítsék ki a vonatkozó környezeti osztályok követelményeit is.

2. VÍZZÁRÓ BETONOK JELLEMZÉSE ÉS TULAJDONSÁGAI

Az építőipari gyakorlatban a beton vízzáró képességét szokás úgy jellemezni, hogy vízzáró az a betonszerkezet, amely annyi vizet enged át, amennyi a védendő, a víznyomással ellentétes oldal felületéről természetes körülmények között elpárolog. Ez a jellemzés a megvalósult szerkezetre nézve helytálló lehet, de a beton vízzáró képességére nem ad teljes értékű, egyértelmű meghatározást (*Dombi* 1969).

Dombi József (1969) javaslatot tett a vízzáróság talajmechanikából ismert *Darcy*-féle törvényen alapuló jellemzésére, mert a beton felfogható úgy is, mint mesterségesen előállított szűrő, hiszen alkotóanyagai – áramlástani szempontból – azonosak vagy közel azonosak az egyes talajfélékkel, így a *Darcy*-féle törvény a betonok esetében is alkalmazható. A *Darcy*-féle törvény a természetes szűrőkön átfolyó vízmennyiség meghatározására szolgál: „Valamely állandó keresztmetszetű szűrőn átfolyó vízmennyiség (Q) arányos a keresztmetszeti felülettel (F), a nyomómagassággal (h), a szűrőanyagot jellemző értékkel (k), és fordítva arányos a szűrőrétegben a megtett út hosszával (ℓ), vagyis a szűrőréteg vastagságával”:

$$Q = k \cdot F \cdot h / \ell$$

A „*k* vízáteresztő képességi tényező” az a sebesség, amellyel a víz időegység alatt, egységnyi szűrőfelületen, adott vízoszlopnyomás mellett átfolyik.

A „k” tényezővel meghatározható a beton falán áthaladó víz mennyisége, tehát segítségével a vízzáróság fogalmát pontos számszerű értékek közé lehet szorítani. Ezen értékek alapján – a beton vízzáróságának jellemzésére – három vízzárósági fokozat ismeretes:

fokozottan vízzáró:	$k = 10$ g/(24 óra · dm^2)
vízzáró:	$k = 20$ g/(24 óra · dm^2)
gyengén vízzáró:	$k = 40$ g/(24 óra · dm^2)

A beton „k” tényezőjének megállapítása számtalan vizsgálati problémát vet fel (*Dombi* 1969).

Az egykori MSZ 4719:1958 szabvány szerint „valamely (B jelű közönséges vagy BS jelű súlyos) betonfajta vízzárósága annak a víznyomásnak att-ban kifejezett értéke, amelynek 48 óráig tartó hatására e betonfajtán az MSZ 4715:1955 szerint végrehajtott vizsgálattal a megfigyelő felületen nedvesség nem mutatkozik, és a víz legfeljebb a próbatest vastagságának egyharmadáig hatol be”. (Ez a meghatározás 200·200·120 mm méretű próbatest esetén 40 mm-t, 400·400·200 mm méretű próbatest esetén 67 mm-t jelent, tehát nehezen értelmezhető.) A vizsgálatnál 1, 2, 4, 8 att nyomásfokozatokat alkalmaztak, és a beton vízzáróságát a vizsgálat eredményétől függően 1 att, 2 att, 4 att vagy 8 att jellel jelölték.

Az ME-19-63:1964 műszaki előírás a vízzáróságot az MSZ 4719:1958 szabvánnyal lényegében azonos módon határozta meg, de részletesebben tárgyalta:

„A vízzáró beton nem vízhatlan; vízzel nem érintkező felületei – párolgási lehetőség hiányában – a legtökéletesebb kivitel esetén is nedvesek lehetnek.
Gyakorlati szempontból a vízzárás mértéke szerint megkülönböztetünk:

- mérsékelten vízzáró beton (esetleg vakolt beton) szerkezetet, melynek 1 m^2 felületén legnagyobb üzemi víznyomás esetén 24 óra alatt legfeljebb 0,4 liter víz szivárog át;
- vízzáró beton (esetleg vakolt beton) szerkezetet, melynek 1 m^2 felületón legnagyobb üzemi víznyomás esetén 24 óra alatt legfeljebb 0,2 liter víz szivárog át. Szabadban vagy jól szellőzött helyiségben ez a víz általában elpárolog a felületről. Az ilyen beton vagy. vasbetonszerkezet vízmedencék, víztornyok készítéséhez alkalmazható, ahol az ilyen mértékű vízveszteség általában megengedhető;

- különleges vízzáró beton (esetleg vakolt beton) szerkezetet, melynek 1 m^2 felületén legnagyobb üzemi víznyomás esetén. 24 óra alatt legfeljebb 0,1 liter víz szivárog át.

A vízzáró beton készítésére vonatkozó részletes irányelveket a MI-8:1954 műszaki előírás tartalmazza."

Az ME-19-63:1964 műszaki előírás foglalkozott a vízzáró betonok alkotóanyagaival, összetételével, készítésével, jelölésével is. Például a 400 kp/cm^2 (40 N/mm^2) nyomószilárdságú, 30 mm legnagyobb szemnagyságú, földnedves konzisztenciájú, 4 att víznyomást kiálló betont így jelölték: „B 400 – 30/1, 4 att-ra vízzáró".

Az MSZ 4719:1958 szabványhoz hasonlóan adta meg a beton vízzáróságának fogalmát az MSZ 15033:1964 R szabvány is: Vízzáró „az a beton, amelyen az MSZ 4715 szerint végrehajtott vízzárósági vizsgálat során a megfigyelő felületén nedvesség nem mutatkozik, és a víz legfeljebb a próbatest vastagságának egyharmadáig hatol be."

Az MSZ 4719:1977 szabvány a vízzáróságot az MSZ 4719:1958 szabvánnyal azonos módon értelmezte, de az 1, 2, 4, 8 att nyomásfokozatnak ellenálló vízzáró betonok jelölésére bevezette a vz 1, vz 2, vz 4 és vz 8 jelet.

A vízzárósági fokozatok 1982-ben valamelyest változtak, az MSZ 4719:1982 szabvány a vz 2, vz 4, vz 6 és vz 8 vízzárósági fokozatokat ismerte 40 mm-es vízbehatolási minősítési értékkel, amely fokozatok hazánkban az új szabványok (MSZ EN 12390-8:2001 és MSZ 4798-1:2004) megjelenéséig voltak érvényben.

A vízzáró betonok megfelelőségi feltételeit és vizsgálati módját az MSZ EN 206-1:2002 európai szabvány nem adja meg, csak annyit említ, hogy a vizsgálati módszerben és a megfelelőségi feltételekben az előírónak (a beton műszaki feltételeit meghatározó személy vagy szervezet) és a gyártónak meg kell egyeznie. Ezért a hazai gyakorlatban követendő alkalmazási követelményeket az MSZ 4798-1:2004 szabvány írja elő. A vízzáró betonoknak alkalmazási céljuktól függően ki kell elégíteniük a fenti *1. táblázatban* szereplő környezeti osztályok szerinti követelményeket.

A vízzáróság vizsgálatát az MSZ EN 12390-8:2001 szabvány 8.10. szakaszában leírt módon kell elvégezni. A vízzáró betonokat a vízzáróság vizsgálat eredménye alapján vz 60, vz 40 vagy vz 20 jelű vízzárósági osztályba kell sorolni.

A MÉASZ ME-04.19:1995 műszaki előírás értelmében a vízzáró betonokhoz CEM I és CEM II/A fajtájú, MSZ EN 197-1:2000 szabvány szerinti általános felhasználású (közönséges) portlandcementeket és ugyan ilyen fajtájú MSZ 4737-1:2002 szabvány szerinti különleges (szulfátálló) portlandcementeket szabad felhasználni.

Az adalékanyag folyamatos szemmegoszlású legyen, szemmegoszlási görbéje a „B" határgörbe közelében haladjon, a 0,25 mm alatti finomrésztartalma (cement és homok együtt) feleljen meg a *3. táblázat* ajánlásának, a homokrészt lehetőleg két frakcióból (0-1 mm és 1-4 mm) kell összeállítani. Az adalékanyag 0-4 mm szemnagyságú homoktartományában az MSZ 18288-2:1984 szabvány 9. fejezete szerinti térfogatos ülepítéssel meghatározott agyag-iszap tartalom megengedett értéke 6 térfogat%.

3. táblázat: Vízzáró beton megkövetelt 0,25 mm alatti finomrésztartalma (MÉASZ ME-04.19:1995)

Legnagyobb szemnagyság mm	Vízzáró beton megkövetelt 0,25 mm alatti finomrésztartalma (cement és homok együtt) kg/m^3	
	Légbuborékképző adalékszer nélkül	Légbuborékképző adalékszerrel, ha a beton egyidejűleg fagyálló (az XF2, XF3, XF4 környezeti osztályba tartozik)
8	525	470
12	485	435
16	450	400
24	415	370
32	380	340
48	350	320
63	320	290
Megjegyzés: A cementtartalom megtervezésekor tekintettel kell lenni a környezeti osztály követelményére is (*1. táblázat*).		

Vízzáró betonok készítése során hasznos a tömítő, a képlékenyítő, a folyósító adalékszerek alkalmazása. Ha a beton kötéskésleltető adalékszert tartalmaz, akkor a friss beton kötés előtti repedéseinek megszüntetését utóvibrálással meg lehet kísérelni.

A puccolános jellegű tömítőanyagoknak (például a pernye és a kohósalak) általában jobb hatásuk van a kész beton tulajdonságaira, mint a tömítő adalékszereknek. Ennek ellenére a tömítő adalékszereknek van egy előnye: míg a tömítő adalékszereket a cement tömegére számított 2-3 %-ot kell adagolni, addig a cement tömegének kb. 1/5-öd részét kitevő puccolános tömítőanyagokat teljesen „cementszerűen" kell az építéshelyen kezelni, és külön összetevőként a betonkeverőbe adagolni (*Dombi* 1969).

A vízzáróságfokozó (tömítő) adalékszerek csökkentik a beton vízfelvételét és a víz betonba való behatolásának mélységét. A szilikáttartalmú vízzáróságfokozó adalékszerek reakcióba lépnek a cement hidratációs termékeivel, aminek hatására kapillárporozitást csökkentő hidro-szilikátok keletkeznek. Ennek ellenére víznyomás hatására vízfelvétellel kell számolni. Alkalmazásuk feltétele, hogy a beton eleve vízzáró és kis vízfelvételű betonnak készüljön. Vízzáróságfokozó adalékszerrel nem lehet a rossz összetételű és rosszul tömörített betont vízzáróvá tenni. A vízzáróságfokozó adalékszerek növelhetik a beton levegőtartalmát, ezáltal csökkenthetik a betonszilárdságot, és növelhetik a zsugorodást.

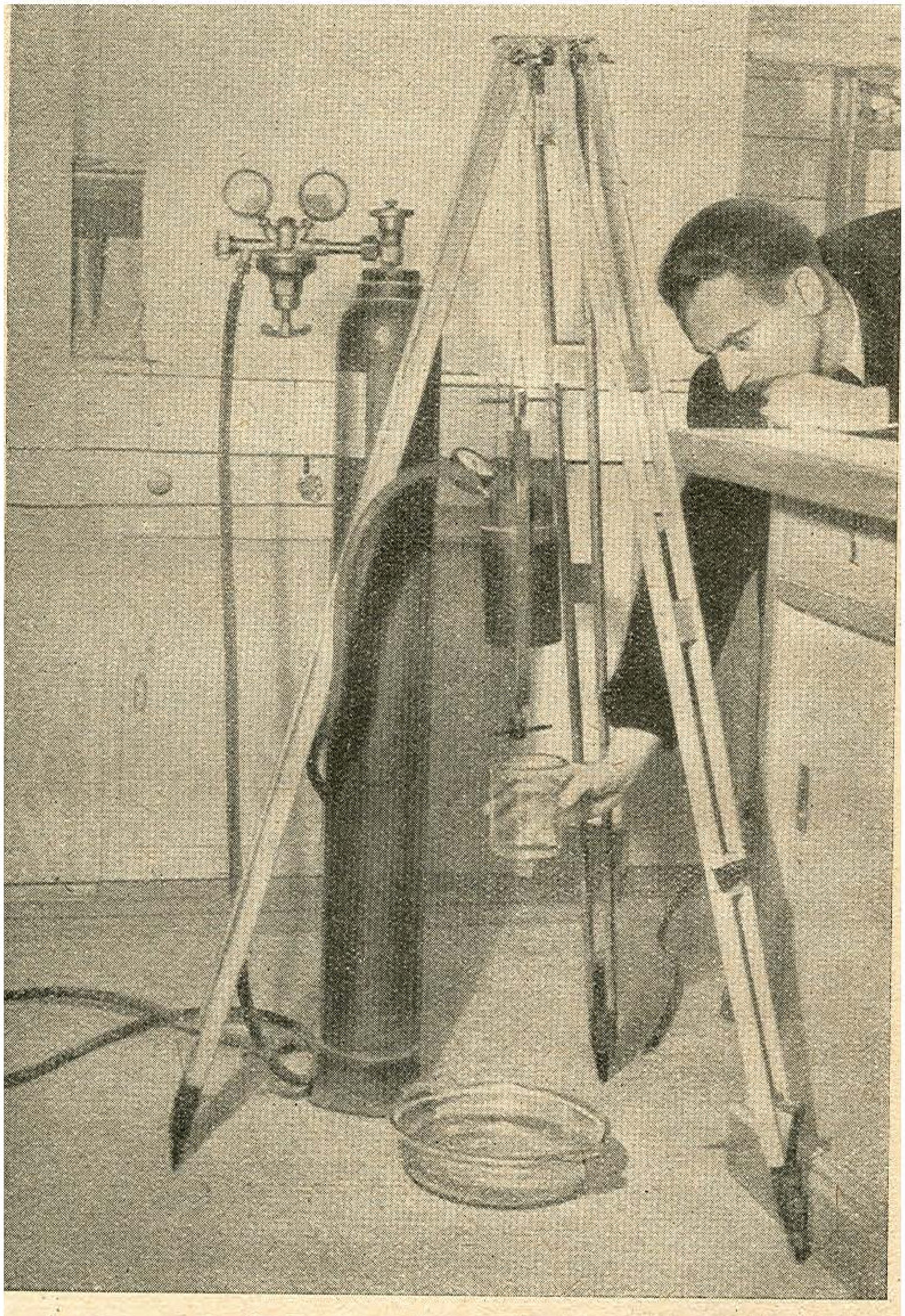
Az MSZ EN 934-2:2002 szerinti követelmények a vízzáróságfokozó adalékszerekre a referencia-betonhoz viszonyított kapilláris vízfelszívás 7 napos utókezelést követően 7 napig, és 90 napos utókezelést követően 28 napig vizsgálva; a referencia-betonhoz viszonyított friss beton levegőtartalom; a referencia-betonhoz viszonyított nyomószilárdság 28 napos korban.

A beton konzisztenciája földnedves vagy kissé képlékeny, mégis jól bedolgozható és szétosztályozódás mentes legyen. Betonozni folyamatosan kell, az előírt betontakarást (MSZ 4798-1:2004) biztosítani kell. Az utókezelést a bedolgozott friss beton kötése (dermedése) után azonnal meg kell kezdeni, és legalább 14 napon át megszakítás nélkül folytatni kell, nem szabad megengedni, hogy a felület kiszáradása megkezdődjék. A szilárduló betont az utókezelés tartama alatt védeni kell a közvetlen napsugárzástól és az erős széltől. (MÉASZ ME-04.19:1995)

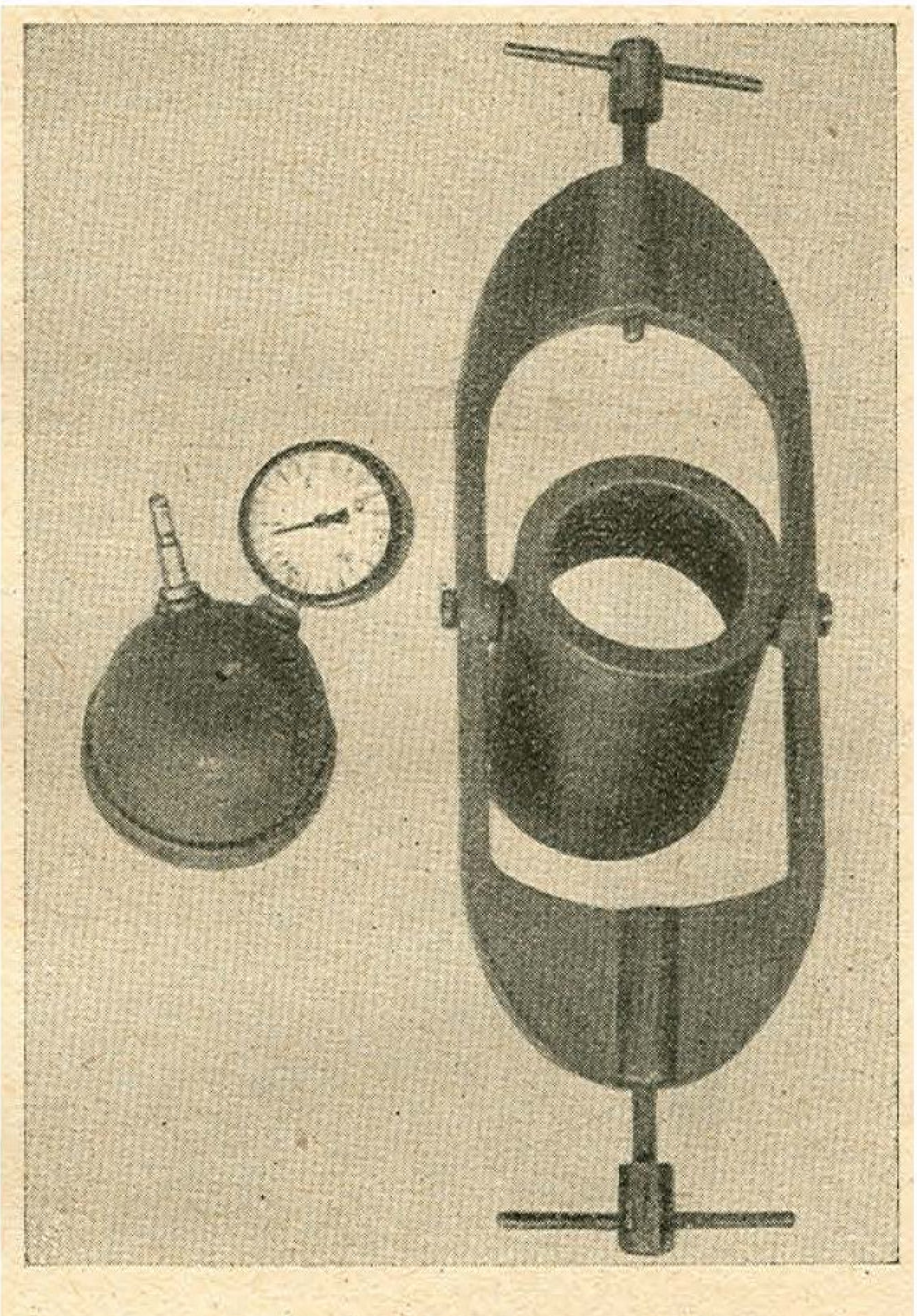
A vízzáró betonok alkalmazásának vízépítési műtárgyak, medencék, tartályok készítésén túl fontos területe az előregyártott gravitációs és nyomócsövek gyártása. A beton, vasbeton és feszített vasbeton csöveket döngöléssel, sajtolással, vibrálással, pörgetéssel (centrifugálással), ill. ezek kombinációjával, például vibrosajtolással (pl. Rocla, Sentab), pörgetéses-vibrálásos-görgőhengerléssel (pl. Siome) állítják elő.

3. VÍZZÁRÓSÁG VIZSGÁLAT

A vízzáróság vizsgálattal kapcsolatban érdemes felidézni *Pogány Béla* (krakkói műszaki egyetemi tanár) 1957-ben megjelent könyvének két ábráját, amelyeken azt látni, hogy – ellentétben egykori hazai előírásainkkal és a mai európai vizsgálati szabvánnyal – a víznyomás a henger alakú próbatest teljes felületére hat, és ezért a vízáram egyenes irányú (*1. ábra*).



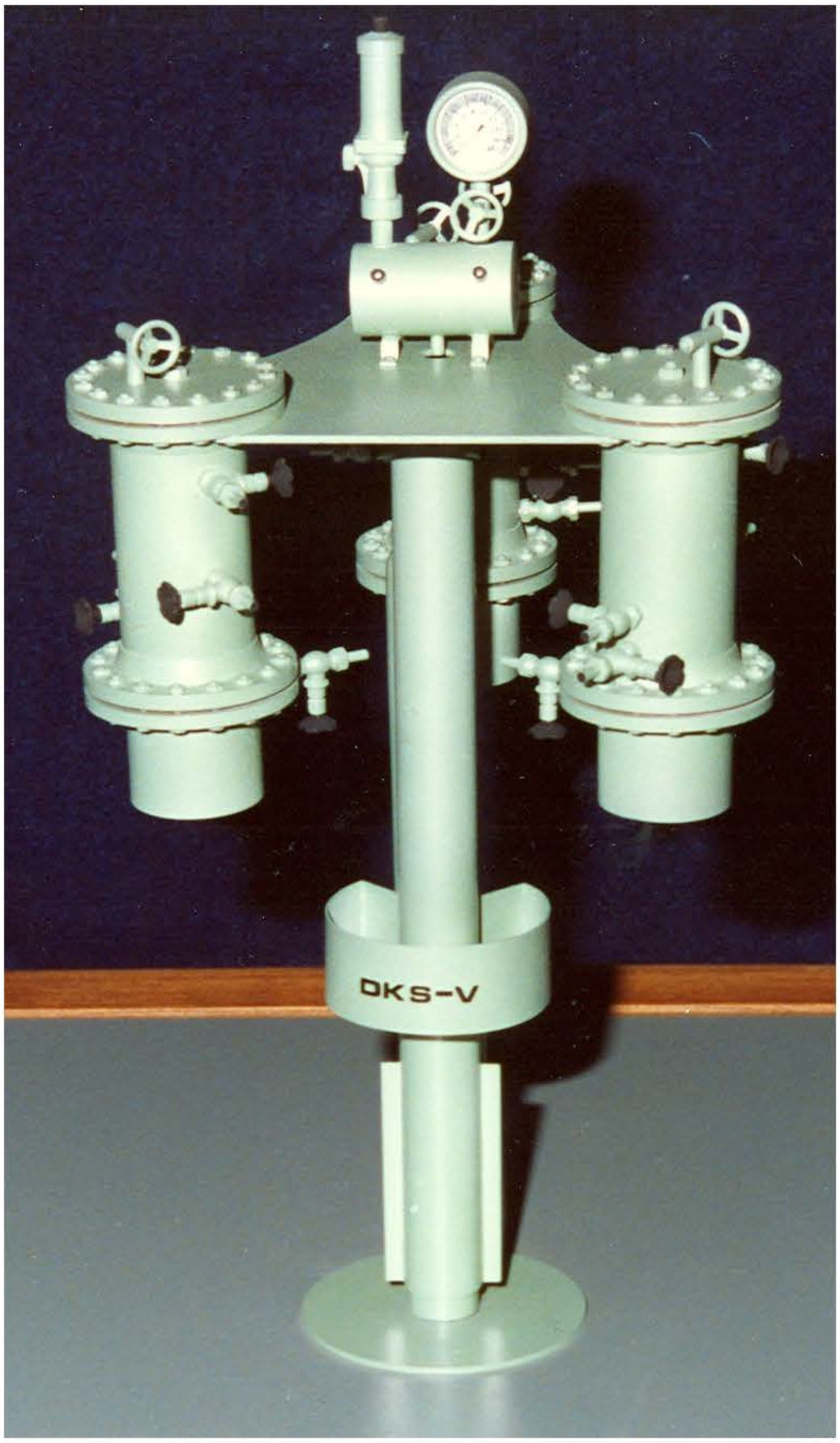
5. ábra. Beton vízzáróságát vizsgáló berendezés és tartozékai



6. ábra. A vízzárósági próbatest elhelyezése

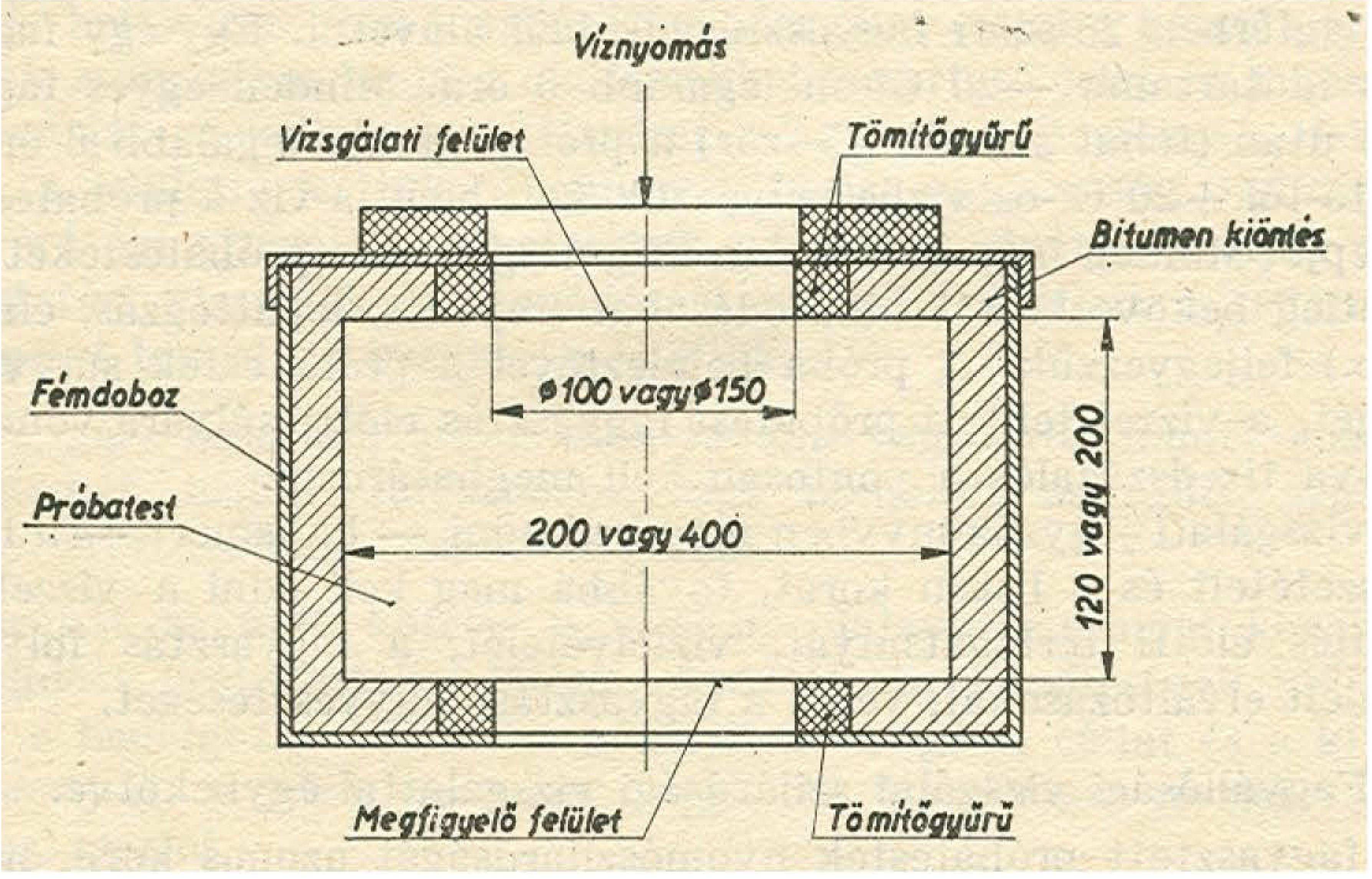
1. ábra: *Pogány Béla* vízzáróság vizsgáló berendezése (1957)

Dombi József az 1969-ben hasonló elven készített vízzáró berendezést, amelynek makettjét a *2. ábrán* mutatjuk be.



2. ábra: *Dombi József* vízzáróság vizsgáló berendezésének makettje (1969)

A vízzáróságot egykor az MSZ 4715:1955 szabvány szerint vizsgálták. A 40 mm-nél nem nagyobb legnagyobb szemnagyságú betonok vízzáróság vizsgálatát 200·200·120 mm méretű próbatesteken végezték. A 48 óránként növelt 1, 2, 4, 8 att víznyomást 100 mm átmérőjű körfelületen működtették. (Ezeket a nyomásfokozatokat az eredeti előírást megváltoztatva a később megjelent MSZ 4719:1958 szabványban írták elő, de az MSZ 4715:1961 szabványban nem vezették át.) A 24 órás korban kizsaluzott, vizsgálati oldalán drótkefével felérdesített próbatestet legalább 28 napos korig (a vizsgálat megkezdéséig) nedves ruhával letakarva, 20±3 °C hőmérsékleten, léghuzatmentes helyen tárolták. Ha az építmény betonjának tárolási körülményei eltértek ettől az előírástól (pl. hőszilárdítás esetén), akkor az építménynél alkalmazott módon kezelték és tárolták a próbatesteket. A vizsgálat megkezdése előtt a próbatestet fémdobozba helyezték, a próbatest és a doboz fala közötti hézagot tömítették (*3. ábra*). A vizsgálattal azt a víznyomást határozták meg, amelynél a megfigyelő felületen nedvesség mutatkozott, és vízáteresztés esetén minden nyomási fokozatban mérték az átszivárgott vízmennyiséget g/cm^3-ben. Az MSZ 4715 szabvány 1961 évi kiadása a vízzáróság tekintetében az 1955 évi kiadással szó szerint megegyezik.



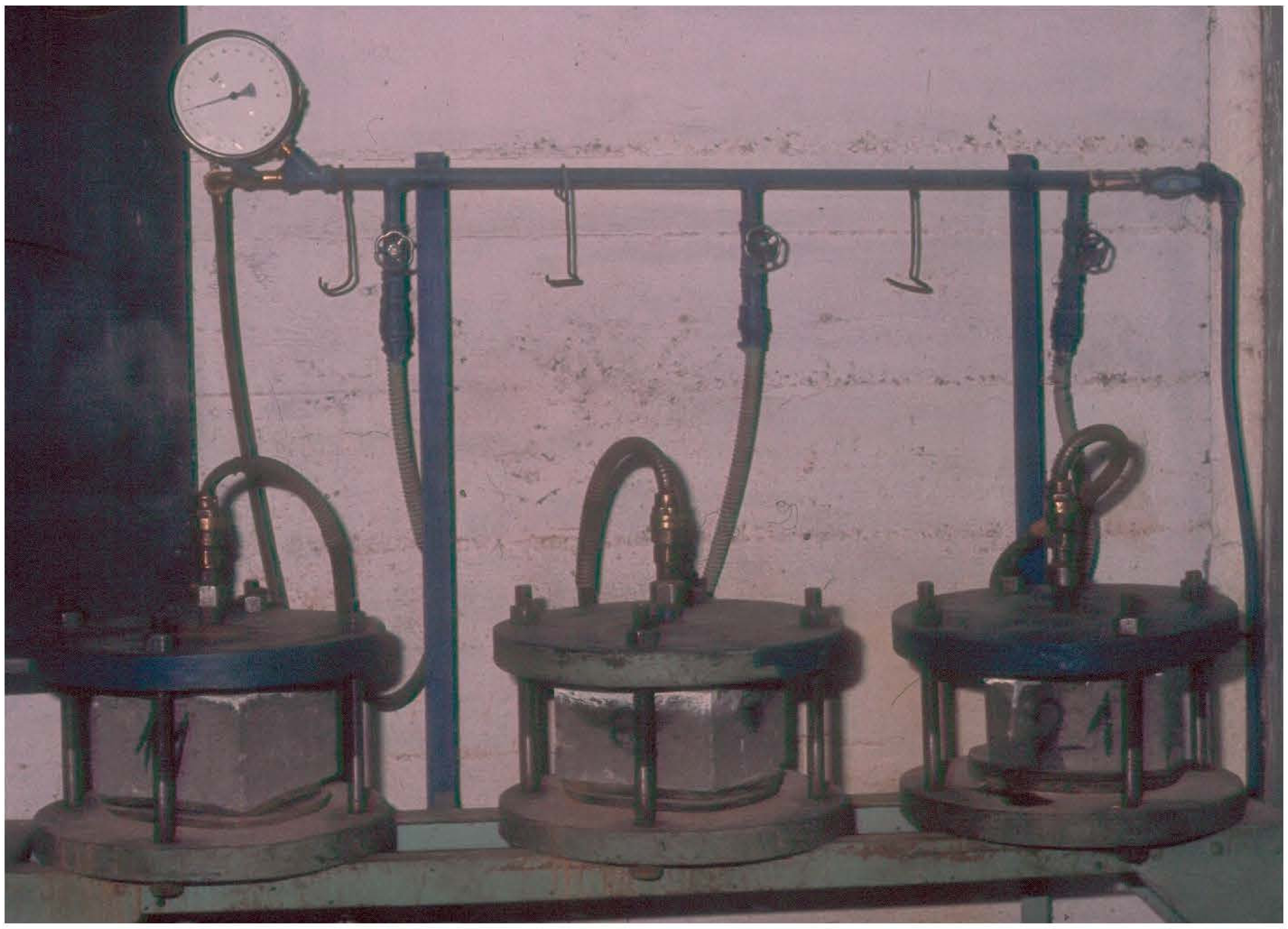
3. ábra: Vízzáróság vizsgálati próbatest helyzete az MSZ 4715:1955 és MSZ 4715:1961 szabvány szerinti vízzáróság vizsgáló berendezésben

A vízzáróság vizsgálata az MSZ 4715-3:1972 szabvány szerint lényegében azonos az MSZ 4715:1961 szabványban leírt módszerrel, de az MSZ 4715-3:1972 szabvány a legfeljebb 32 mm legnagyobb szemnagyságú betonok esetére megengedi a 150 mm átmérőjű és 120 mm magas próbahengerek vizsgálatát is. A próbatesteket a korábbi előírásokkal ellentétben nem helyezik fémdobozba, hanem két fej közé szorítják (*4.* és *5. ábra*).

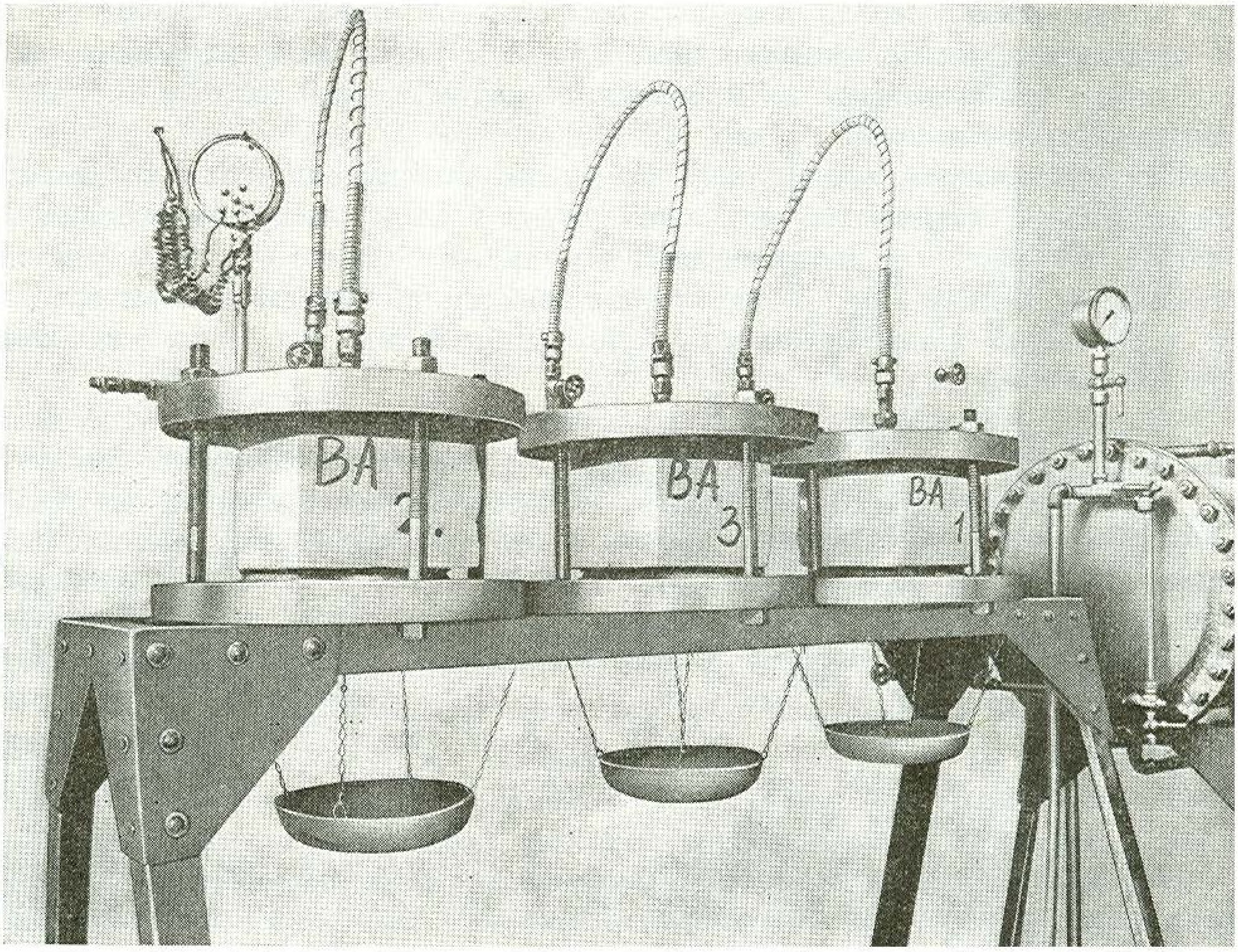
Az MSZ 4715-3:1972 szabvány szerint „a próbatesteket 48 órán át 10 N/cm^2 (1 bar = 1 att), ezt követően 24 óránként – a nedves folt megjelenéséig – megkétszerezve 20, 40, 80, 160 N/cm^2 (2, 4, 8, 16 bar) túlnyomásnak kell alávetni. Az előírt nyomásfokozatokat – a nyomókamrában mérve – ± 3% pontossággal kell betartani.

Óránként ellenőrizni kell a vízfogyasztást, és meg kell vizsgálni, hogy a próbatest alsó felületén észlelhető-e nedves folt.

A nedves folt megjelenésekor az alsó gyűjtőedényt, ha az eddig nem volt felszerelve, vízzáróan a próbatest vízzáró burkához kell rögzíteni. A nedves folt megjelenésekor ható nyomást további 24 órán át kell működtetni, és a vízfogyasztást a nedves folt megjelenésétől számított 2, 6, 12, 18 és 24 óra múlva kell a vízmérőkön leolvasni.



4. ábra: MSZ 4715-3:1972 szabvány szerinti vízzáróság vizsgáló berendezés



5. ábra: Fénykép *Palotás László*: Általános anyagismeret c. könyvéből (1979)

Az MSZ 4715-3:1972 szabvány szerint a vizsgálat befejezése után az alsó vízgyűjtő edényben levő vizet a próbatest alsó felületéről hozzácseppentett vízcseppekkel együtt 0,1 g pontosságra kell megmérni.

A próbatestet a vizsgálat után a víznyomás irányával párhuzamosan (lehetőleg középen) azonnal el kell hasítani az MSZ 4715-4 szerint. Meg kell figyelni a hasított felületen a próbatest belsejének állapotát és a nedvesített felület alakját.

Ha a vizsgálat folyamán a legnagyobb nyomásfokozatnál sem keletkezett vízátszivárgás, akkor ezt a fokozatot 24 órán át kell működtetni a próbatestre, azután az előző bekezdésben leírtaknak megfelelően el kell hasítani és meg kell határozni a nedvesített felület alakját és nagyságát."

Az MSZ 4719:1982 szabvány melléklete a vízzáróság vizsgálatot az MSZ 4715-3:1972 szabványhoz nagyon hasonlóan szabályozza, eltérés azonban, hogy a vizsgálatot 2, 4, 6 és 8 bar nyomáson végezteti el. Az MSZ 4715-3:1972 szabvány és az MSZ 4719:1982 szabvány melléklete szerinti vízzárósági vizsgálatot MSZ EN 12390-8:2001 szabvány szerinti vizsgálat váltotta fel (*6. ábra*).

6/a. ábra: Korszerű vízzáróság vizsgáló berendezés

6/b. ábra: A 6/a. ábra szerinti vízzáróság vizsgáló berendezés teljes fényképe

A beton vízzáróságát az MSZ EN 12390-8:2001 szabvány szerint, legalább 28 napos korú, végig víz alatt tárolt próbatesten, 75 mm átmérőjű körfelületen 72 ± 2 órán át ható 5 bar (0,5 ± 0,05 MPa) állandó víznyomáson kell vizsgálni. A próbatest víznyomásra merőleges, felérdesített oldalának hossza vagy átmérője legalább 150 mm, magassága legalább 100 mm legyen, következésképpen a vizsgálatot a Magyarországon szokásos 200·200·120 mm méretű

próbatesten is el szabad végezni, de ugyanígy alkalmas a 150 mm élhosszúságú szabványos próbakocka is.

Ha a próbatest mérete 200·200·120 mm, akkor 100 mm átmérőjű körfelületen is szabad az 5 bar víznyomást alkalmazni, de ebben az esetben a vizsgálati jegyzőkönyvben a próbatest méretét és a vízzel nyomott körfelület átmérőjét is meg kell adni.

Magyarországon szabad a vízzáróssági próbatestet vegyesen, azaz 7 napos korig víz alatt, utána laborlevegőn tárolni - ha ebben előzetesen írásban megállapodás születik -, de ebben az esetben a vizsgálati jegyzőkönyvben a tárolás módját (vegyesen tárolva) is meg kell adni. Ha a beton lassabban szilárduló cementtel készült (CEM II), akkor csak a víz alatt tárolt próbatestek vizsgálati eredményeit szabad mértékadónak tekinteni.

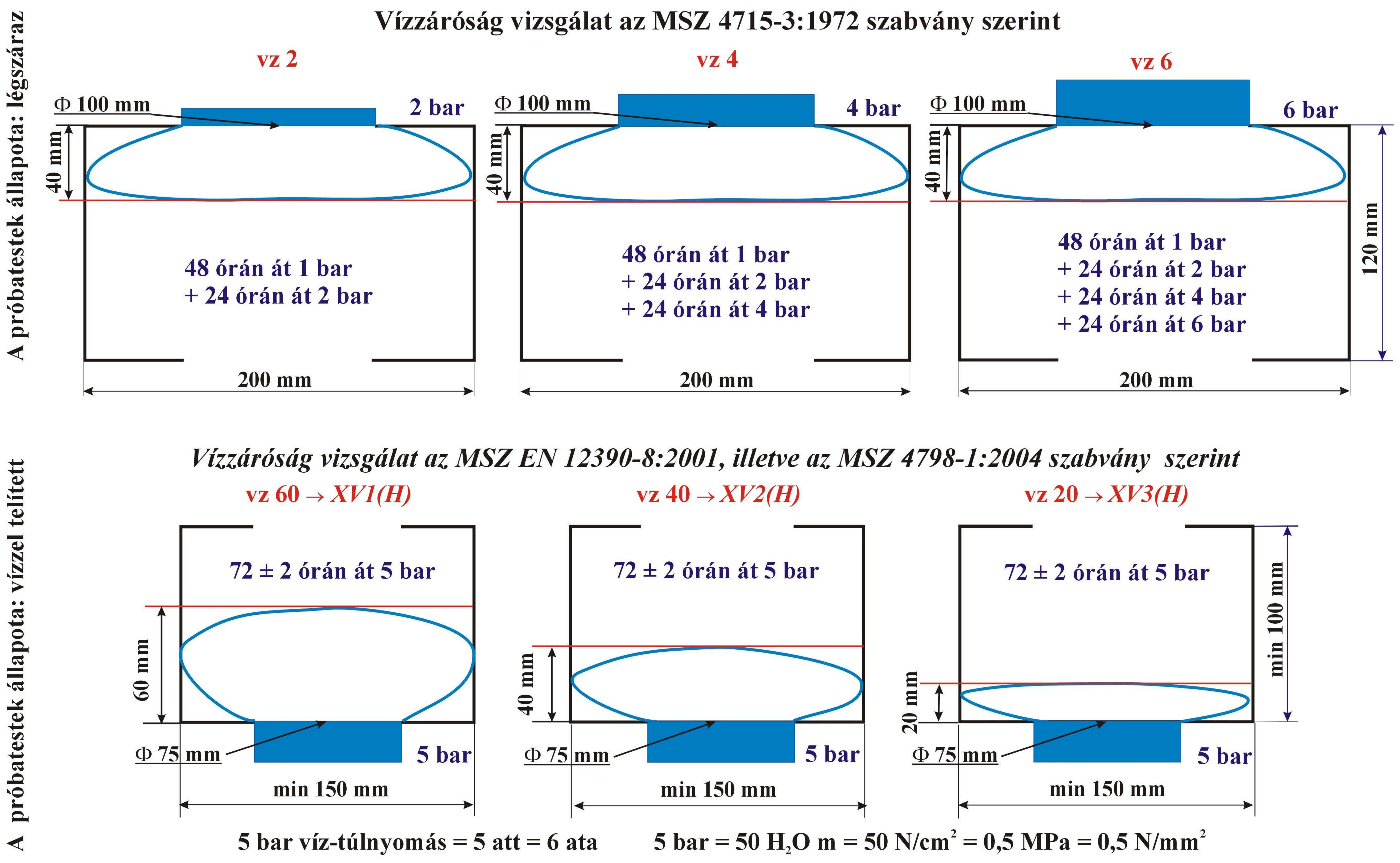
A vízzáróság vizsgálathoz 100 m^3 beton-térfogatonként legalább 1 db, de tételenként legalább 3 db próbatestet kell készíteni vizsgálatonként.

A beton vízzáróságának követelményét az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.3. szakasza tárgyalja.

A beton vízzárósága a tárolási módtól függetlenül akkor megfelelő, ha a vizsgálat eredményeként minden egyes próbatesten a vízbehatolás mélysége:

- XV1(H) környezeti osztály esetén legfeljebb 60 mm; jele: vz 60;
- XV2(H) környezeti osztály esetén legfeljebb 40 mm; jele: vz 40;
- XV3(H) környezeti osztály esetén legfeljebb 20 mm; jele: vz 20.

A vízzáróság fogalmának és vizsgálatának régi és új értelmezését a *7. ábrán* vetjük össze.



7. ábra: A vízzáróság fogalmának és vizsgálatának régi (MSZ 4715-3:1972) és új (MSZ EN 12390-8:200) értelmezése.
Megjegyzés: Az „att” a technikai túlnyomás, az „ata” a technikai abszolút nyomás jele.

ÖSSZEFOGLALÁS

A vízzáróság vizsgálat régi (MSZ 4715-3:1972) és új (MSZ EN 12390-8:2001) módszere közötti legfőbb különbség, hogy szemben a régi eljárással, ma a vízzáróságot általában végig víz alatt tárolt próbatesten (Magyarországon - ha ebben előzetesen írásban megállapodás születik - szabad a vízzárósági próbatestet vegyesen, azaz 7 napos korig víz alatt, utána laborlevegőn tárolni), 75 mm átmérőjű körfelületen 72 ± 2 órán át ható 5 bar (0,5 ± 0,05 MPa) állandó víznyomáson kell vizsgálni; és a beton vízzárósága a tárolási módtól függetlenül akkor megfelelő, ha a vizsgálat eredményeként minden egyes próbatesten a vízbehatolás mélysége XV1(H) környezeti osztály esetén legfeljebb 60 mm; (jele: vz 60), XV2(H) környezeti osztály esetén legfeljebb 40 mm; (jele: vz 40), XV3(H) környezeti osztály esetén legfeljebb 20 mm; (jele: vz 20).

HIVATKOZÁSOK

MSZ 4715:1955	Megszilárdult beton vizsgálata
MSZ 4715-3:1972	Megszilárdult beton vizsgálata. Hidrotechnikai tulajdonságok
MSZ 4719:1958	A betonok fajtái és jelölésük
MSZ 4737-1:2002	Különleges cementek. 1. rész: Szulfátálló cementfajták
MSZ 4798-1:2004	Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőség. Az MSZ EN 206-1 és alkalmazási feltételei Magyarországon
MSZ 15033:1964 R	Beton- és vasbeton terminológia
MSZ 18288-2:1984	Építési kőanyagok szemszerkezeti és szennyeződési vizsgálata. Szemmegoszlás vizsgálata ülepítéssel
ME-19-63:1964	Műszaki előírás beton és vasbeton készítésére. Építésügyi Minisztérium É. M. Építésügyi Dokumentációs Iroda. Budapest, 1964
MÉASZ ME-04.19:1995	Beton és vasbeton készítése. 8. fejezet. Vízzáró betonok. Műszaki előírás
MSZ EN 197-1:2000	Cement. 1. rész: Az általános felhasználású cementek összetétele, követelményei és megfelelőségi feltételei
MSZ EN 206-1:2002	Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőség
MSZ EN 934-2:2002	Adalékszerek betonhoz, habarcshoz és injektálóhabarcshoz. 2. rész: Betonadalékszerek. Meghatározások, követelmények, megfelelőség, jelölés és címkézés
MSZ EN 12350-7:2000	A friss beton vizsgálata. 7. rész: Légtartalom Nyomásmódszerek
MSZ EN 12390-8:2001	A megszilárdult beton vizsgálata. 8. rész: A vízzáróság vizsgálata
Dombi József:	Vízzáró beton. SZIKKTI 29. sz. tudományos közleménye. ÉTK. Budapest, 1969
Palotás László:	Mérnöki szerkezetek anyagtana 1. Általános anyagismeret. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1979
Pogány Béla:	A nagyszilárdságú beton néhány problémája. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1957

VÍZZÁRÓ BETON ÉS VIZSGÁLATA

Dr. Balázs L. György – Dr. Kausay Tibor

Megjelent a Vasbetonépítés c. folyóirat XII. évfolyam, 2010. évi 2. számában, pp. 47-57.

A rómaiak már kétezer évvel ezelőtt építettek vízgyűjtőket, vízvezetékeket, úszómedencéket, kikötőket, völgyzárógátakat, de korszerű vízzáró beton és vasbeton szerkezetek is már évtizedek óta épülnek. Az építés környezeti, igénybevételi, használati stb. feltételei azonban korunkban folyamatosan változnak, és ez az igény-oldali fejlődés nem csak a szerkezettel, hanem a vízzáró betonnal szemben is növekvő követelményeket támaszt. A követelmények előírások formájában jelennek meg, a vízzáró betonok megfelelősége vizsgálatokkal igazolható, amelyek változását e cikkben tekintjük át.

Kulcsszavak: beton, vízzáró beton, vízzáróság, vizsgálat, környezeti osztály

1. BEVEZETÉS

Azoknak a beton és vasbeton szerkezeteknek, amelyek vizet vagy más folyadékot nem engedhetnek át, megfelelő szerkezeti kialakításúaknak, korlátozott repedés-tágasságúaknak és vagy vízszigetelteknek, vagy vízszigetelés nélkül is vízzáróaknak kell lenniük. A szerkezet szigetelés nélküli vízzáróságához nem elegendő a vízzáró beton alkalmazása, hanem az átmenő repedések tágasságát is korlátozni kell, a munka és tágulási hézagokat vízzáró kivitelben kell elkészíteni, a betont különös gonddal kell beépíteni, tömöríteni és utókezelni.

A vízzáró beton készítésével az európai előírások kevéssé foglalkoznak, de minthogy egyrészt az európai szabványok honosításával a vonatkozó régi magyar szabványokat visszavonták, másrészt az irodalom szerint a nemzetek folyamatosan keresik a vízzáró beton készítésének jobb feltételeit, és kísérleti eredményeiket például műszaki irányelvek formájában ültetik át a gyakorlatba, időszerű a vízzáró beton fogalma, követelménye és vizsgálati módja fejlődését áttekinteni.

2. VÍZZÁRÓ BETON JELLEMZÉSE ÉS TULAJDONSÁGAI

2.1. A vízzáró beton fogalma és követelményei a XIX. és XX. században

A beton- és vasbetonépítés kezdeti időszakában – a fogalom számszerűsítése és vizsgálati módszer hiányában – vízzárónak azt a betonszerkezet tekintették, amely annyi vizet enged át, amennyi a védendő, víznyomással ellentétes oldal felületéről természetes körülmények között elpárolog.

Mihálik János, aki a Duna menti Bezdánnál 1854 őszén – 90 nap alatt, több száz tapasztalatlan földműves napi 18 órai munkájával, jórészt víz alatti, elsőként folyamatos betonozással, összesen mintegy 17 ezer m^3 beton kézi bedöngölésével – megépítette az első magyar, teljesen betonból készült vízi műtárgyat, a hajózható Ferencz József zsilipet, 1860-ban megjelent könyvében írja, hogy az építéshelyen próbaképpen vízhatlan pincét építettek betonból. A könyvben a beton vízzáróságáról azonban több szó nem esik (*Mihálik* 1860).

Nendtvich Gusztáv (máshol *Nendtwich*) könyvében a lábatlani román cementtel kapcsolatban olvashatjuk, hogy „az állandó országház díszlépcsője mellett levő udvarokban, éppen a víz elzárása céljából 0 és + 0,75 m között (a Duna 0 pontja fölött) készült egy betonréteg, amely eszerint többször 5 m magas vízoszlop nyomásának is ki volt téve, s mindennek dacára az alapgödörben, amint azt az alapvető munkák felülvizsgálásáról fölvett jegyzőkönyv is fölemlíti, a betonon keresztül víz nem szivárgott, még ezen a 0,75 m vastag rétegen keresztül sem." (*Nendtvich* 1889).

Németországban a XIX. – XX. század fordulóján a talajvízszint alatti pincék vasbeton talpboltozatát vízzáró cementhabarccsal vonták be, erre védőbeton került, amelynek felső vízszintes síkját esztrich réteggel zárták le. A vízzáró cementhabarcs bevonatot a talpboltozatról az oldalfalakra is felvezették. Vízzáró cementhabarcsot ívhidak védelmére is alkalmaztak. A pasingi (München) papírgyári kút – 7,6 m-rel a várható legmagasabb talajvízszint alá nyúló – szivattyú aknájának fenekét és oldalfalát 1902-ben vízzáró vasbetonból építették. A víz- és folyadéktárolók, víztornyok, csövek is készültek vízzáró vasbetonból. A *Ways & Freytag* cég kísérleti vasbeton csövei 3 at nyomást éveken át szivárgás nélkül hordtak, húsz évi használat után meggyőződtek a *Monier*-rendszerű vasbeton csatornacsövek vasbetéteinek rozsdamentességéről, és ezzel bizonyítva látták, hogy a beton a vasbetétet megvédi a korróziótól (*Mörsch* 1908).

Zielinski Szilárd tervei alapján 1905-1906-ban épült a Hármaskörösön a bökényi duzzasztómű és kamarazsilip. A vasbeton kamra cementpéppel bevont, majd bevakolt, simára csiszolt fenéklemezét és oldalfalait vízszigetelés céljából magnéziumfluáttal, majd megszáradása után cinkfluáttal befecskendezték. A fluátok a cementhabarcs szabad meszével és alkáliáival, mintegy 0,5-1,0 mm vastag rétegben, vízben oldhatatlan fluorvegyületet alkotnak. A Margitszigeti víztorony *Zielinski Szilárd – Ray Rezső – Beck Alajos – Grubics Henrik* munkája nyomán 1910-1911 között épült meg. A tárolómedence vízzáróságát a káliszappanos oldattal készített betonfelületre felhordott fluátozás nélküli csiszolt cementsimítással biztosították (*Hajós* 2004).

A korai hazai vasbetonépítés kiemelkedő eseményei közé tartozott a soroksári Duna-ág felső torkolati kamarazsilipjének megépítése 1911-1913 között, amelyről – beleértve a széleskörű betonkísérleteket is – *Lampl Hugó* és *Sajó Elemér* 1914-ben kiadott könyvében számol be. A kamarazsilip építése kapcsán óhatatlanul felmerült a beton helyenkénti vízzáróságának szükségessége, így a vasbeton műtárgy kisvíz alatt fekvő részében és az oldalfalak többségében traszt adagoltak a beocsini portlandcementhez, hogy a betont „vízáthatlanabbá" tegyék. Ennek érdekében emelték a legnagyobb szilárdságot adó keverékhez képest a homokadagolást is.

A XX. század elején a betonműtárgyak vízzáróságát általában vagy a betonfelületek bevonásával (például vízzáró traszcement vakolat, bitumenes szigetelés, felületi fluátos tömítő-kezelés), burkolásával (például fagyálló tégla, kő, klinker, csempe, elsősorban a fagyállóság érdekében), vagy trasznak, trasznak és mészhidrátnak, esetleg káliszappanos víznek a portlandcement-betonba keverésével biztosították. Hazánkban – a jelentős trasz-előfordulások és gazdasági okok folytán is – a trasz kiegészítőanyagos vízzáróbeton alkalmazása terjedt el leginkább. A vízzáró trasz-portlandcement-beton összetételével és szilárdsági tulajdonságaival a korabeli irodalom részletesen foglalkozott (*Lampl – Sajó* 1914), a trasz minőségét, szállítási feltételeit előírásokban szabályozták (*Határozatok* 1909, *Sajó-feltételek* 1913). A trasz adagolás általában a portlandcementre vett 10-15 tömeg% volt, a felső határt a portlandcement, illetve a cementkő szabad mesze (értve alatta a kalciumhidroxidot) szabta meg, amelyet a trasz leköt. A vízzáróság fokozásán kívül azt hangsúlyozták, hogy a trasz adagolás a szabad mész kilúgozásával járó hátrányokat megszünteti, de – bár akkoriban tényleges vasbeton szerkezetek alig, inkább csak vasalt betonszerkezetek készültek – a fokozódó vasbetét korrózió veszéllyel nem számoltak. Magyarországon főképp a selypi traszt alkalmazták, sőt azt a Selypi Cementgyár oltott mészporral keverve „Vulkán-cement" néven forgalmazta (*Lampl – Sajó* 1914).

A XX. század közepén már törekedtek a beton vízzáróságának egyértelmű meghatározására és vizsgálatára.

Otto Graf több mint húsz éves tapasztalata, hogy a betonok vízzáróságát a cement típusok, illetve tulajdonságok – értve alatt a klinker égetés technológiát, az összetételt, a fajlagos felületet, a vízmegtartó képességet – jelentősen befolyásolják. Saját 1928 és *K. Walz* 1931 évi publikációjára is hivatkozva megállapította, hogy a cementtartalom növekedése javítja a habarcs és a beton vízzáróságát; a vízzáróság szempontjából nagy szerepet játszik a hidratáció

mértéke és az azzal járó zsugorodás; a víz-cement tényező, a konzisztencia és az adalékanyag szemmegoszlása, a beton porozitása; a finomra őrölt trasz, mészkőliszt és egyéb kőlisztek, a mészhidrát adagolása – ha a bedolgozhatóságot javítja, akkor – csökkenti a vízátersztőképességet. A vízzáró betont minél hosszabb ideig vizesen kell utókezelni, a beton vízzáróképessége a korával növekszik. A betont terhelő vizek finom hordaléka és a laza beton részecskék sokszor eltömik a beton pórusait, de akár kémiai folyamatok is javíthatják a vízzáróságot: például ha a külső víz szénsavas, akkor az a beton szabad kalcium-hidroxidjával vízben oldhatatlan kalcium-karbonátot képezhet. Mindent egybevetve, *Otto Graf* véleménye, hogy legalább 240 kg/m^3 cementadagolással, 35-45 cm terülési mértékkel, kiváló szemmegoszlással, kellő bedolgozással és utókezeléssel, adott falvastagság mellett, stuttgarti példa szerint akár nagy nyomásnak (70 at) is ellenálló vízzáró betont lehet készíteni (*Graf* 1950).

Alfred Hummel könyvében a beton tulajdonságait befolyásoló tényezőket 15 szabályba foglalta össze, a hetedikben szól arról, hogy a beton vízzáróságára az adalékanyag szemszerkezete, a cementtartalom, a konzisztencia, a tömörítés és a pép pórustartalma van hatással. Az adalékanyag szemmegoszlása a középső hatásgörbe közelében helyezkedjék el, a szemek alakja gömbölyű (homokos kavics), a beton konzisztenciája kissé képlékeny, cementtartalma legalább 250 kg/m^3 legyen. A víz-cement tényező csökkentése, a nedves tárolás, a beton kora, a karbonátosodás javítja, a beton kiszáradása rontja a vízzáróságot (*Hummel* 1959).

A vízzáró beton témakörével *Palotás László* valamennyi könyvében foglalkozott. Alapvető nézetéről 1952-ben így írt: „Kellő tömöttségű s gyakorlatilag vízátnemeresztő betont alkalmazunk egyrészt víztartályoknál, víznek kitett építmények falainál, burkolatoknál, másrészt támadó vizeknek kitett betonoknál. Tökéletesen – bármely nyomás mellett – vízzáró betonról természetesen nem lehet szó, mert bármilyen jó legyen is a beton, csupán meglassítja a víz átszivárgását és a mennyiséget annyira lecsökkenti, hogy az a természetes felületi párolgás folytán eltűnik." Követelményként szabta, hogy a 12 cm vastag vízzáró beton 48 órán keresztül legalább 1,5 atm nyomást kibírjon. Ajánlásai a következők voltak: A vízzáró beton készítéséhez legalább 300 kg/m^3, legfeljebb 350 kg/m^3 portlandcement, traszportlandcement, kohósalak-portlandcement, S-54-es portlandcement szükséges (agresszív hatások esetén fordított fontossági sorrendben); a cementadagolás vastag falak esetén csökkenthető esetleg 250 kg/m^3-ig. Az adalékanyag hézagtérfogata kicsi, de a fajlagos fiktív felülete a szokásosnál nagyobb legyen; a homok ne tartalmazzon 3 térfogat%-nál több iszapot; a homokban a 0,25 mm alatti szemek mennyisége ne legyen több 15 tömeg%-nál; a legnagyobb szemnagyság általában (a mai értelemben vett) 24 mm-nél ne legyen nagyobb, lehetőleg a falvastagság 1/5-e, legfeljebb 1/3-a, legfeljebb a vasbetétek közének 80 %-a – de legalább 5 mm-rel csökkentett távolsága – legyen; a finomsági modulus az egyébként legkedvezőbb értéknél mintegy 10 %-kal kisebbre választandó; a 0/2, 2/4, 4/12, 12/24 mm-es szemek tömegaránya 25:25 % legyen. A megfelelő adalékszerek használata előnyös. A beton konzisztenciája gyengén képlékeny legyen, és 14 napig nedvesen utókezelendő (*Palotás* 1952, 1961).

Palotás László az 1959-ben és 1980-ban megjelent kötetében különlegesen vízzárónak, vízzárónak, mérsékelten vízzárónak nevezi az anyagot, ha a vízáteresztés mértéke (sebessége) adott vizsgálati nyomáson k = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 liter/m^2/(24 óra) értéknél, azaz 1, 2, 3, 4 g/dm^2/(24 óra) nem nagyobb. 1979-ben, a „Mérnöki szerkezetek anyagtana" 1. kötetében részletesen foglalkozott a talajmechanikából ismert *Darcy*-törvénnyel, amelynek segítségével az anyag folyadék-áteresztőképessége jellemezhető, mert például a beton felfogható úgy is, mint mesterségesen előállított szűrő, hiszen alkotóanyagai – áramlástani szempontból – azonosak vagy közel azonosak az egyes talajfélékkel, így a *Darcy*-féle törvény a betonok esetében is alkalmazható. A *Darcy*-féle törvény a természetes szűrőkön átfolyó vízmennyiség meghatározására szolgál: „Valamely állandó keresztmetszetű szűrőn átfolyó vízmennyiség (Q) arányos a szürőanyagot jellemző értékkel (k), a keresztmetszeti felülettel

(A), a nyomómagassággal (h), és fordítva arányos a szűrőrétegben a megtett út hosszával (ℓ), vagyis a szűrőréteg vastagságával":

$$Q = k \cdot A \cdot h/\ell = k \cdot A \cdot i$$

ahol $i = h/\ell$ a hidraulikus gradiens, k pedig a permeabilitás, illetve esetünkben a víz-áteresztőképességi tényező. A k víz-áteresztőképességi tényező az a sebesség, amellyel a víz időegység alatt, egységnyi (szűrő)felületen, adott vízoszlopnyomás mellett átfolyik. (*Palotás* 1959, 1979, 1980).

Palotás László a „Mérnöki szerkezetek anyagtana" 3. kötetében jó vízzáró beton készítéséhez 550 (mai 52,5), 450 (mai 42,5) szilárdsági jelű, vagy S-54 (mai CEM I 32,5 S) jelű portlandcementet, közepesen vízzáróhoz 350-20 (mai CEM II/A-S 32,5) jelű kohósalak-portlandcementet vagy (mai CEM II/A-V 32,5) pernye-portlandcementet ajánlott. A vízzáró beton összetételére az *1. táblázat* szerinti tájékoztató adatokat adta meg (*Palotás – Balázs* 1980).

1. táblázat: A vízzáró beton összetétele (*Palotás – Balázs* 1980)

Beton összetétel	Legnagyobb szemnagyság, mm		
	16	24	32
Cement legalább, kg/m^3	400	375	350
Víz-cement tényező	Legfeljebb 0,6		
Konzisztencia	Kissé képlékeny		
Szemnagyság, mm	Összes fennmaradt anyag mennyisége, tömeg%		
0/1	30	25	25
1/4	30	25	20
4/8	20	20	20
8/16	20	16	13
16/24	–	14	12
24/32	–	–	10
0,25 mm alatt legalább, kg/m^3	450	430	400
Finomsági modulus	5,6	6,0	6,3

A vízzáróság kutatásával részletesen foglalkozott *Dombi József*, aki vizsgálati eredményeit a vízbehatolás mértékének meghatározásával és a *Darcy*-féle törvény felhasználásával is értékelte. Kísérletei során szabványos méretű (200·200·120 mm) próbatesteken vizsgálta a cement, az adalékanyag, a trasz, kohósalak, pernye kiegészítőanyagok, különböző adalékszerek, a konzisztencia, a keverési idő, a bedolgozási energia hatását a vízzáróságra. Kialakított egy nagyelemes vizsgálati módszert is, amellyel 100 cm magas, 80 cm belső átmérőjű, 12 cm falvastagságú betoncső vízzáróságát vizsgálta. Munkája kiterjedt a munkahézagok összebetonozása közötti idő vízzáróságra gyakorolt hatásának kutatására is (*Dombi József* 1969).

Az egykori MSZ 4719:1958 szabvány szerint „valamely (B jelű közönséges vagy BS jelű súlyos) betonfajta vízzárósága annak a víznyomásnak att-ban kifejezett értéke, amelynek 48 óráig tartó hatására e betonfajtán az MSZ 4715:1955 szerint végrehajtott vizsgálattal a megfigyelt felületen nedvesség nem mutatkozik, és a víz legfeljebb a próbatest vastagságának egyharmadáig hatol be". (Ez a meghatározás 200·200·120 mm méretű próbatest esetén 40 mm-t, 400·400·200 mm méretű próbatest esetén 67 mm-t jelentett, tehát nehezen értelmezhető.) Az MSZ 4719:1958 szabvány a vizsgálatnál – az MNOSZ 934:1949, MNOSZ 934:1951 és MSZ 4715:1955 vizsgálati szabványtól eltérően – 1, 2, 4, 8 att víznyomásfokozatot írt elő, és a beton vízzáróságát a vizsgálat eredményétől függően 1 att, 2 att, 4 att vagy 8 att jellel jelölte. Tehát 1958-ig a vízzáróság nyomásfokozata, illetve jele

1 att, 3 att, 7 att volt. (1 att = 1 kp/cm^2 = 0,981 bar; és 1 bar = 1,0197 kp/cm^2 = 10^5 N/m^2 = 10 N/cm^2 = 0,1 N/mm^2). 1958-1972 között pedig kettősség állt fenn, mert ebben az időszakban az érvényes vizsgálati szabvány (MSZ 4715) 1 att, 3 att, 7 att, az érvényes betonszabvány (MSZ 4719) 1 att, 2 att, 4 att, 8 att víznyomással vizsgáltatta, illetve minősíttette a vízzáró betont.

Az MSZ 4719:1958 szabványhoz hasonlóan adta meg a beton vízzáróságának fogalmát az MSZ 15033:1964 R szabvány is: Vízzáró „az a beton, amelynek az MSZ 4715:1961 szerint végrehajtott vízzárósági vizsgálat során a megfigyelt felületén nedvesség nem mutatkozik, és a víz legfeljebb a próbatest vastagságának egyharmadáig hatol be". (Az MSZ 15033:1964 R szabványjellel kapcsolatban megjegyezzük, hogy az *R betűjel* annak idején azt jelentette, hogy a szabvány alkalmazása nem kötelező, hanem csak ajánlott. Ugyanis a nemzeti szabványosításról szóló 1995. évi XXVIII. törvény hatálybalépéséig a szabványok alkalmazása Magyarországon kötelező volt, azóta önkéntes. Jogszabály 2002. január 1. óta szabvány alkalmazását nem teszi kötelezővé.)

Az ME-19-63:1964 műszaki előírás a vízzáróságot az MSZ 4719:1958 szabvánnyal lényegében azonos módon határozta meg, de részletesebben tárgyalta:

„A vízzáró beton nem vízhatlan; vízzel nem érintkező felületei – párolgási lehetőség hiányában – a legtökéletesebb kivitel esetén is nedvesek lehetnek.

Gyakorlati szempontból a vízzárás mértéke szerint megkülönböztetünk:

- mérsékelten vízzáró beton (esetleg vakolt beton) szerkezetet, melynek 1 m^2 felületén legnagyobb üzemi víznyomás esetén 24 óra alatt legfeljebb 0,4 liter víz szivárog át;
- vízzáró beton (esetleg vakolt beton) szerkezetet, melynek 1 m^2 felületón legnagyobb üzemi víznyomás esetén 24 óra alatt legfeljebb 0,2 liter víz szivárog át. Szabadban vagy jól szellőzött helyiségben ez a víz általában elpárolog a felületről. Az ilyen beton vagy. vasbetonszerkezet vízmedencék, víztornyok készítéséhez alkalmazható, ahol az ilyen mértékű vízveszteség általában megengedhető;
- különleges vízzáró beton (esetleg vakolt beton) szerkezetet, melynek 1 m^2 felületén legnagyobb üzemi víznyomás esetén. 24 óra alatt legfeljebb 0,1 liter víz szivárog át.

A vízzáró beton készítésére vonatkozó részletes irányelveket a MI-8:1954 műszaki előírás tartalmazza."

Az ME-19-63:1964 műszaki előírás foglalkozott a vízzáró betonok alkotóanyagaival, összetételével, készítésével, jelölésével is. Például a 400 kp/cm^2 (40 N/mm^2) nyomószilárdságú, 30 mm legnagyobb szemnagyságú, földnedves konzisztenciájú, 4 att víznyomást kiálló betont így jelölték: „B 400 – 30/1, 4 att-ra vízzáró".

Az MSZ 4719:1977 szabvány a vízzáróságot az MSZ 4719:1958 szabvánnyal azonos módon értelmezte, és átvette az 1, 2, 4, 8 att nyomásfokozatnak ellenálló vízzáró betonok jelölésére 1958 óta alkalmazott vz 1, vz 2, vz 4 és vz 8 jelet.

A vízzárósági fokozatok 1982-ben valamelyest változtak, az MSZ 4719:1982 szabvány a vz 2, vz 4, vz 6 és vz 8 vízzárósági fokozatokat ismerte 40 mm-es vízbehatolási minősítési értékkel, amely fokozatok hazánkban az új szabványok (MSZ EN 12390-8:2001, ma MSZ EN 12390-8:2009 és MSZ 4798-1:2004) megjelenéséig voltak érvényben.

2.2. A vízzáró beton fogalma és követelményei napjainkban

A tartósság érdekében a beton, vasbeton, feszített vasbeton szerkezetek építéséhez használt betonkeverékek összetétele meg kell feleljen a rendeltetésük szerinti környezeti osztályokhoz tartozó követelményeknek, amelyek a beton megkövetelt nyomószilárdsági osztálya, a megkövetelt cementtartalom, a megengedett legnagyobb víz-cement tényező és a friss beton megkövetelt testsűrűségét meghatározó megengedett legnagyobb levegőtartalom határértéke (*Kausay, 2009*).

Az MSZ EN 206-1:2002 európai betonszabvány a vízzáró betonok környezeti osztályaival nem foglalkozik, a vízzáró betonok megfelelőségi feltételeit és vizsgálati módját nem adja

meg, csak annyit említ, hogy a vizsgálati módszerben és a megfelelőségi feltételekben az előírónak (a beton műszaki feltételeit meghatározó személynek vagy szervezetnek) és a gyártónak meg kell egyeznie.

Ezért a hazai gyakorlatban követendő alkalmazási követelményeket – legalább 50 év tervezett használati élettartamot feltételezve – az MSZ 4798-1:2004 szabvány, az európai betonszabvány magyar nemzeti alkalmazási dokumentuma írja elő. A vízzáró betonoknak alkalmazási céljuktól függően ki kell elégíteniük a környezeti osztályok *2. táblázatban* szereplő követelményeit.

2. táblázat: Vízzáró betonok környezeti osztályai az MSZ 4798-1:2004 szabvány alapján

Vízzárósági osztály az MSZ EN 12390-8:2001 (MSZ 12390-8:2009) szabvány 8.10. szakasza szerinti vizsgálat eredménye alapján	Környezeti osztály jele	Beton nyomó-szilárdsági osztálya, legalább	Beton cement-tartalma, legalább, kg/m³	Beton víz-cement tényezője, legfeljebb	Friss beton levegő-tartalma, legfeljebb, térfogat%
Vízzáró beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek					
vz 60 jelű vízzáró beton	XV1(H)	C25/30	300	0,60	1,0
	Például: Pincefal, csatornafal, mélyalap, áteresz, folyóka, surrantóelem, mederlap, mederburkolóelem, rézsűburkolat, legfeljebb 1 m magas víztároló medence, záportározó, esővízgyűjtő akna				
vz 40 jelű fokozottan vízzáró beton	XV2(H)	C30/37	300	0,55	1,0
	Például: Vízépítési szerkezetek, gátak, partfalak, 1 m-nél magasabb víztároló medence, föld alatti garázs, aluljáró külön szigetelőréteg nélkül, földalatti alaptestek, kiegyenlítő lemezek				
vz 20 jelű igen vízzáró beton	XV3(H)	C30/37	300	0,50	1,0
	Például: Mélygarázs, mélyraktár, alagút külön szigetelőréteg nélkül				
Megjegyzés: Ha a vízzáró betont fagyhatás éri, akkor a megfelelő XF környezeti osztály, ha agresszív környezetben fekszik, akkor a vonatkozó XA, XD esetleg XS környezeti osztály követelményeit is figyelembe kell venni. A fagy- és a kémiai hatás a beton szükséges szerkezeti falvastagságának és megengedett repedéstágasságának értékét is befolyásolhatja.					

A beton vízzáróságának követelményét az MSZ 4798-1:2004 szabvány 5.5.3. szakasza tárgyalja.

A beton vízzárósága a tárolási módtól függetlenül akkor megfelelő, ha a vizsgálat eredményeként minden egyes próbatesten (a beton vízzáróságának értékeléséhez három próbatest szükséges) a vízbehatolás mélysége:

- XV1(H) környezeti osztály esetén legfeljebb 60 mm; jele: vz 60;
- XV2(H) környezeti osztály esetén legfeljebb 40 mm; jele: vz 40;
- XV3(H) környezeti osztály esetén legfeljebb 20 mm; jele: vz 20.

A MÉASZ ME-04.19:1995 műszaki előírás szerint – amely tartalmilag igen értékes és értelemszerűen ma is figyelembe veendő – a vízzáró betonokhoz 32,5; 42,5 és 52,5 szilárdsági jelű CEM I típusú tiszta portlandcementeket, 32,5 és 42,5 szilárdsági jelű kohósalak-portlandcementet, CEM II/A típusú trasz- vagy pernye- vagy mészkőliszt- vagy kompozit-portlandcementet cementeket szabad felhasználni.

Az adalékanyag folyamatos szemmegoszlású legyen, szemmegoszlási görbéje a „B" határgörbe közelében haladjon, a 0,25 mm alatti finomrész-tartalma (cement és homok együtt) feleljen meg a *3. táblázat* ajánlásának, a homokrészt lehetőleg két frakcióból (0-1 mm és 1-4 mm) kell összeállítani. Az adalékanyag 0-4 mm szemnagyságú homoktartományában

az MSZ 18288-2:1984 szabvány 9. fejezete szerinti térfogatos ülepítéssel meghatározott agyag-iszap tartalom megengedett értéke 6 térfogat%.

3. táblázat: Vízzáró beton megkövetelt 0,25 mm alatti finomrész-tartalma (MÉASZ ME-04.19:1995)

Legnagyobb szemnagyság mm	Vízzáró beton megkövetelt 0,25 mm alatti finomrész-tartalma (cement és homok együtt) kg/m^3	
	Légbuborékképző adalékszer nélkül	Légbuborékképző adalékszerrel, ha a beton egyidejűleg fagyálló (az XF2, XF3, XF4 környezeti osztályba tartozik)
8	525	470
12	485	435
16	450	400
24	415	370
32	380	340
48	350	320
63	320	290
Megjegyzés: A cementtartalom megtervezésekor tekintettel kell lenni a környezeti osztály követelményére is (*2. táblázat*).		

Vízzáró betonok készítése során hasznos a tömítő, a képlékenyítő, a folyósító adalékszerek alkalmazása. Ha a beton kötéskésleltető adalékszert tartalmaz, akkor a friss beton kötés előtti repedéseinek megszüntetését utóvibrálással meg lehet kísérelni.

A puccolános jellegű tömítőanyagoknak (például a pernye és a kohósalak) általában jobb hatásuk van a kész beton tulajdonságaira, mint a tömítő adalékszereknek. Ennek ellenére a tömítő adalékszereknek van egy előnye: míg a tömítő adalékszereket a cement tömegére számított 2-3 %-ot kell adagolni, addig a cement tömegének kb. 1/5-öd részét kitevő puccolános tömítőanyagokat teljesen „cementszerűen" kell az építéshelyen kezelni, és külön összetevőként a betonkeverőbe adagolni (*Dombi* 1969).

A vízzáróságfokozó (tömítő) adalékszerek csökkentik a beton vízfelvételét és a víz betonba való behatolásának mélységét. A szilikáttartalmú vízzáróságfokozó adalékszerek reakcióba lépnek a cement hidratációs termékeivel, aminek hatására kapillárporozitást csökkentő hidro-szilikátok keletkeznek. Ennek ellenére víznyomás hatására vízfelvétellel kell számolni. Alkalmazásuk feltétele, hogy a beton eleve vízzáró és kis vízfelvételű betonnak készüljön. Vízzáróságfokozó adalékszerrel nem lehet a rossz összetételű és rosszul tömörített betont vízzáróvá tenni. A vízzáróságfokozó adalékszerek növelhetik a beton levegőtartalmát, ezáltal csökkenthetik a betonszilárdságot, és növelhetik a zsugorodást.

A vízzáróságfokozó (tömítő) adalékszerek sajátos követelményeit az MSZ EN 934-2:2009 szabvány 9. táblázata tartalmazza. A vizsgálati habarcs kapilláris vízfelszívása a 7 napos utókezelést követően 7 napig vizsgálva az ugyanilyen referencia-habarcs kapilláris vízfelszívásának legfeljebb 50 %-a, és a 90 napos utókezelést követően 28 napig vizsgálva az ugyanilyen referencia-habarcsénak legfeljebb 60 %-a lehet; a vizsgálati friss beton levegőtartalma a friss referencia-beton levegőtartalmánál legfeljebb 2 térfogat%-kal lehet nagyobb; a vizsgálati beton nyomószilárdsága 28 napos korban érje el a referencia-beton 28 napos korban meghatározott nyomószilárdságának 85 %-át. Az üzemi gyártásellenőrzés során a kapilláris vízfelszívást 1000 tonnánként évente legalább három alkalommal kell vizsgálni, és a 90 napos utókezelés utáni kapilláris vízfelszívás vizsgálata elhagyható.

A vízzáró beton konzisztenciája földnedves vagy kissé képlékeny, mégis jól bedolgozható és szétosztályozódás mentes legyen. Betonozni folyamatosan kell, az előírt betontakarást (MSZ 4798-1:2004) biztosítani kell. Az utókezelést a bedolgozott friss beton kötése (dermedése) után azonnal meg kell kezdeni, és legalább 14 napon át megszakítás nélkül folytatni kell; nem szabad megengedni, hogy a felület kiszáradása megkezdődjék. A szilárduló betont az utókezelés tartama alatt védeni kell a közvetlen napsugárzástól és az erős széltől. (MÉASZ ME-04.19:1995)

A vízzáró betonok alkalmazásának vízépítési műtárgyak, medencék, tartályok készítésén túl fontos területe az előregyártott gravitációs és nyomócsövek gyártása. A beton, vasbeton és feszített vasbeton csöveket sajtolással, vibrálással, pörgetéssel (centrifugálással), ill. ezek kombinációjával, például vibrosajtolással (pl. Rocla, Sentab), pörgetéses-vibrálásos-görgőhengerléssel (pl. Siome) állítják elő.

Az MSZ ENV 13670-1:2000 európai előszabvány a vízzáró betonszerkezetek kivitelezésével kapcsolatos külön követelményt nem tartalmaz. Ezzel szemben a DIN 1045-3:2008 német betonszerkezet kivitelezési szabvány foglalkozik a vízzáró betonokkal, és a szabvány 4. táblázatában a vízzáró beton próbatestek vizsgálatára a 2. ellenőrzési osztályt írja elő. A vízzáró beton 1. ellenőrzési osztályba sorolását csak akkor engedi, ha a szerkezeti elemre a víznyomás ideiglenesen hat, és a műszaki leírás másképp nem rendelkezik. Az 1. ellenőrzési osztályban a vizsgálatot a gyártó vagy megbízottja végzi, míg a 2. ellenőrzési osztályban a megfelelőség igazolásához kijelölt vizsgáló állomás bevonása is szükséges.

A XX.-XXI. század fordulóján a német szóhasználatban változás következett be, míg korábban a vízzáró betont „wasserundurchlässiger Beton"-nak („vízátnemeresztő beton"-nak) vagy rövidítve „WU-Beton"-nak nevezték, addig ma „Beton mit hohem Wassereindringwiderstand"-ról („nagy vízbehatolási ellenállású beton"-ról) beszélnek (*Freimann* 2006).

A vízzáró betonszerkezetek követelményeire Németországban irányelvet dolgoztak ki (DAfStb WU-Richtlinie, 2003 és Erläuterungen zur DAfStb-Richlinie, 2006). A betonszerkezetek vízzárósága a beton, a fugák, a repedések, a szerelvény átvezetések vízzáróságától függ. Az 1. igénybevételi osztályban nyomás alatti vagy nyomás nélküli víz, a 2. igénybevételi osztályban talajnedvesség hat a betonra. A falszerkezeti elem vastagsága az 1. igénybevételi osztályban helyszíni betonozás esetén legalább 240 mm, előregyártott elem esetén legalább 200 mm, alaplemez esetén legalább 250 mm, illetve legalább 200 mm kell legyen, ha a beton víz-kötőanyag tényezője legfeljebb 0,55, konzisztenciája a képlékenynél (F3 terülési osztálynál) nem szárazabb (terülési mértéke legalább 420 mm), nyomószilárdsági osztálya legalább C30/37, legnagyobb szemnagysága legfeljebb 16 mm. A 2. igénybevételi osztályban a falszerkezeti elem vastagsága helyszíni betonozás esetén legalább 200 mm, előregyártott elem esetén legalább 100 mm, alaplemez esetén legalább 150 mm, illetve legalább 100 mm kell legyen. A DAfStb WU-Richtlinie lényegében abból indul ki, hogy legalább 20 cm falvastagság és legfeljebb 0,55 víz-cement tényező esetén a repedésmentes betonon keresztül – függetlenül a hidrosztatikus nyomástól és a rétegfelépítéstől – kapilláris vízáramlás nem történik (*Lohmeyer – Ebeling* 2009).

A víz az átmenő repedésen átszivárog, az egyoldali hajlítási repedéseken csak beszivárog a betonba. Ha a repedésmentes hajlítási nyomott öv elég vastag, akkor az felveszi a víznyomást. A finom átmenő repedések is csak nagyon kevés vizet eresztenek át, mégpedig olyan keveset, hogy néhány heti nedvesedés után úgy beszűkülnek, hogy a beton víztől védett túloldalán legfeljebb nedves foltok maradnak. Kutatások alátámasztják, hogy a víznyomás gradiens (jele: i), azaz a vízoszlopmagasság és a betonfalvastagság viszonyszáma fontos szerepet játszik a víznek repedéseken való átszivárgásában. Például, ha a vízoszlop 2 m magas, akkor 20 cm vastag fal esetén a w_k = 0,2 mm – az MSZ EN 1992-1-1:2005 szabvány 7.3.4. szakasza, illetve a DIN 1045-1:2008 szabvány 11.2.4. szakasza szerint – „számított repedéstágasságú" átmenő repedések még nem eresztik át a vizet, de ha a vízoszlop 12 m

magas és a fal 40 cm vastag, akkor az átmenő repedések számított tágassága legfeljebb w_k = 0,1 mm lehet (*Springenschmid* 2007).

Megfigyelték, hogy bizonyos körülmények között a repedések „begyógyulhatnak". Ennek kémiai-fizikai okát a kalciumkarbonát képződésben (karbonátosodás), az utólagos hidratációban, a cementgél duzzadásában, mechanikai okát a víz által szállított beton vagy egyéb finom részecskék tömítő hatásában kell keresni. A repedések „öngyógyulásának" (németül: „Selbstheilung" vagy „Selbstabdichtung") feltétele általában 10-50 napi előzetes átnedvesedés, továbbá, hogy a vízszivárgás sebessége kicsi legyen, a repedések mozdulatlanok legyenek (a mozgás legfeljebb egytizede lehet a számított repedéstágasságnak), a szivárgó víz ne tartalmazzon a betonra nézve agresszív összetevőket (XA1 környezeti osztályúnál ne legyen korrozívabb). A repedések öngyógyulására akkor lehet számítani, ha $w_k \leq 0,20$ mm számított repedéstágasság esetén a víznyomás gradiens $i \leq 10$, $w_k \leq 0,15$ mm esetén $i \leq 20$, $w_k \leq 0,10$ mm esetén $i \leq 30$ és $w_k \leq 0,05$ mm esetén $i \leq 40$. Ha az átmenő repedés öngyógyulása nem következik be, akkor a vízzárást injektálással kell biztosítani (Erläuterungen zur DAfStb WU-Richtlinie, 2006).

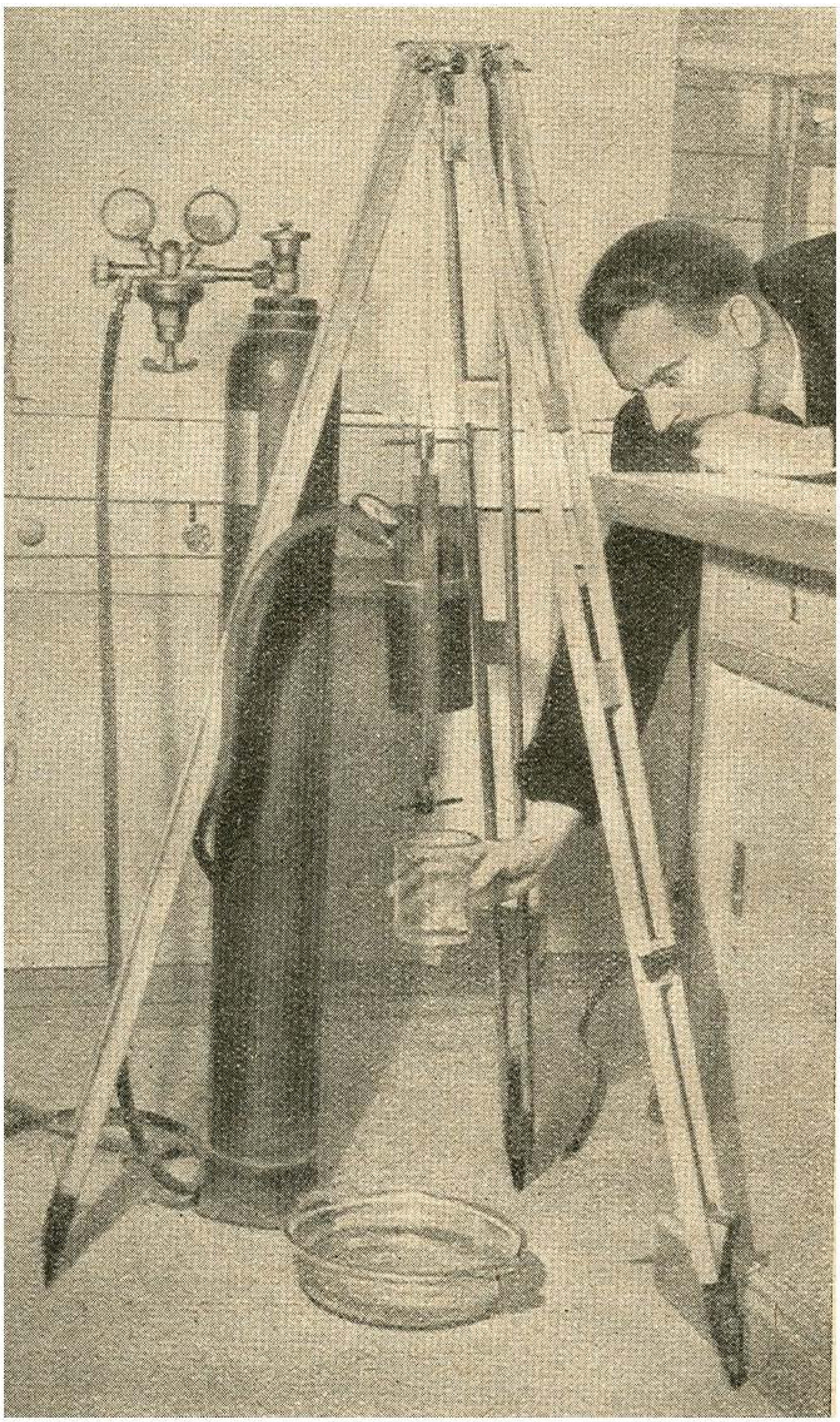
A *2. táblázatban* megjegyeztük, hogy ha a vízzáró beton a betonra nézve agresszív vízzel érintkezik, akkor a beton és a szerkezet tervezése során a vízzáróság feltételein kívül a kémiai korrózió hatását is figyelembe kell venni. A vizek agresszivitásának kérdése azonban inverz értelemben is fenn áll.

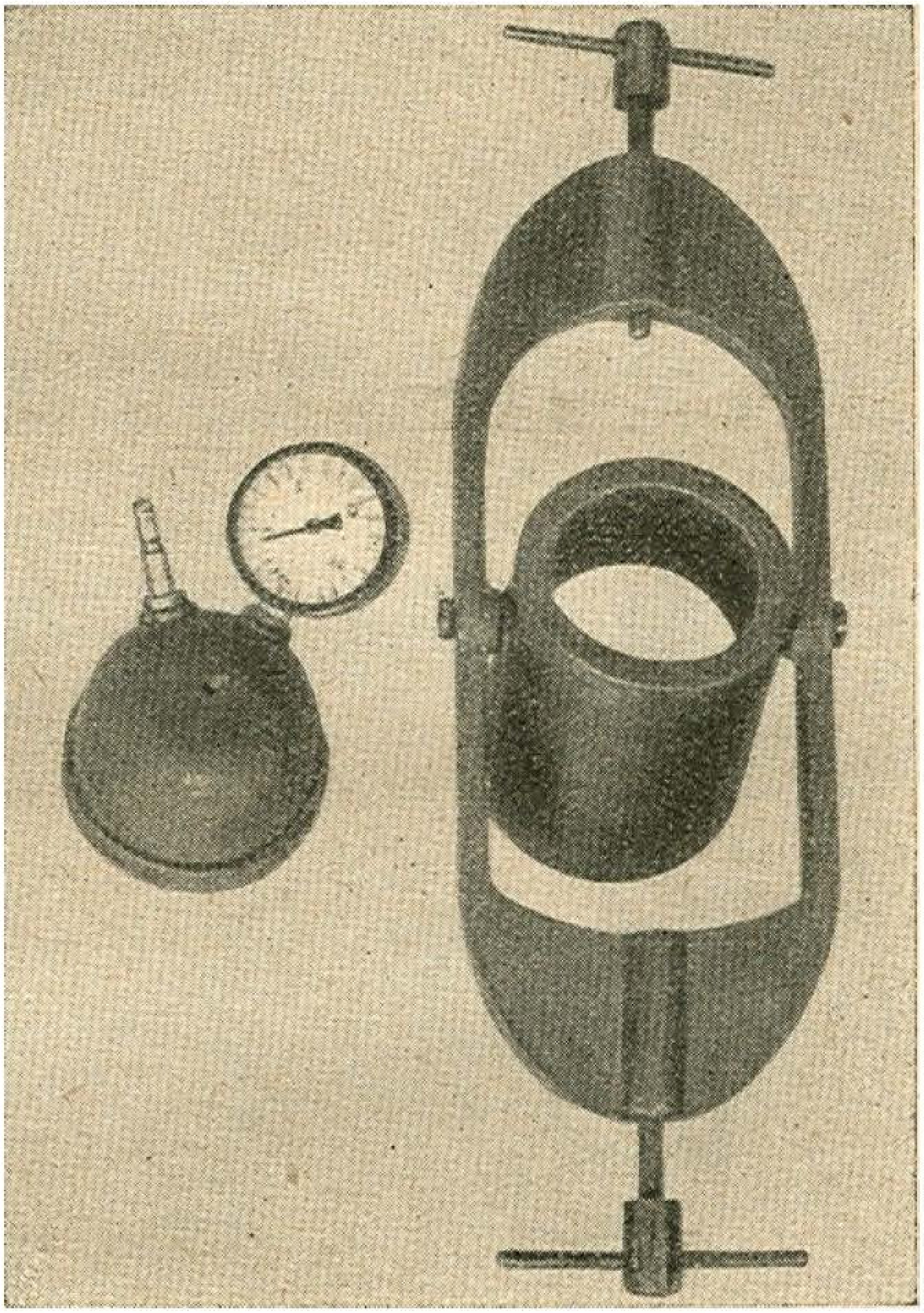
Németországban a felszíni vizek, tengervizek, talajvizek védelme érdekében külön irányelv foglalkozik az olyan szigetelés nélküli beton és vasbeton építmények, elsősorban kármentők, tárolók, folyókák stb., illetve azok betonjának folyadékzárásával (FD-Beton, **f**lüssigkeits**d**ichter Beton), amelyek a vizek tisztaságát veszélyeztető folyékony anyagokat tartalmaznak (DAfStb Wassergefährdende Stoffe, 2004). Az irányelv három részből áll. Az első rész a hatásokat és szerkezeti kialakításokat, a második rész a beton folyadékzárási tulajdonságokat és követelményeket, a harmadik a károsodott beton helyreállításának feltételeit tárgyalja. A folyadékzáró beton víz-cement tényezője, illetve víz-kötőanyag tényezője legfeljebb 0,5, nyomószilárdsági osztálya legalább C30/37 legyen. Készítéséhez tiszta portlandcement (CEM I), legfeljebb 20 tömeg% kiegészítőanyagot tartalmazó portlandcement (CEM II/A), bármely kohósalak- és pernyeportlandcement (CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-V, CEM II/B-V), és legfeljebb 80 tömeg% granulált kohósalakot tartalmazó kohósalakcement (CEM III/A és CEM III/B) használható. A cementpép tartalom a 290 liter/(beton m^3) értéket ne lépje túl. Az adalékanyag legnagyobb szemnagysága 16-32 mm között, a szemmegoszlási görbe az A-B határgörbék között helyezkedjék el. A folyadékzáró beton légbuborékképző adalékszerrel is készülhet. A beton konzisztenciája a képlékenynél (F3 terülési osztálynál) ne legyen folyósabb. Ha e feltételek valamelyike nem teljesül, akkor a beton 72 órás folyadékzárását n-hexan (C_6H_{14}) és di-klórmetán (CH_2Cl_2) folyadékban meg kell vizsgálni. A folyadékbehatolás mélysége repedés nélküli beton esetén általában 40 mm-nél ne legyen nagyobb. A szálerősítésű beton vagy a tömítőréteges beton folyadékzárásával az irányelv külön pontjai foglalkoznak.

Ha a vizek tisztaságát veszélyeztető folyadékot hordozó beton és vasbeton építményt a felszíni vizek, tengervizek, talajvizek védelme érdekében szigetelni kell, akkor Németországban a szigetelendő beton nyomószilárdsági osztálya legalább C25/30, átlagos tapadószilárdsága legalább 1,5 N/mm^2, legkisebb tapadószilárdsága legalább 1,0 N/mm^2, ha 1 mm-nél vastagabb műgyanta bevonat kerül rá, akkor a tapadószilárdsága legalább 2,0 N/mm^2, illetve 1,5 N/mm^2 legyen, és repedéstágassága – tekintettel a bevonat repedéstágasság áthidaló képességére – nem lehet 0,5 mm-nél nagyobb (*Blessing* 2008).

3. VÍZZÁRÓSÁG VIZSGÁLAT

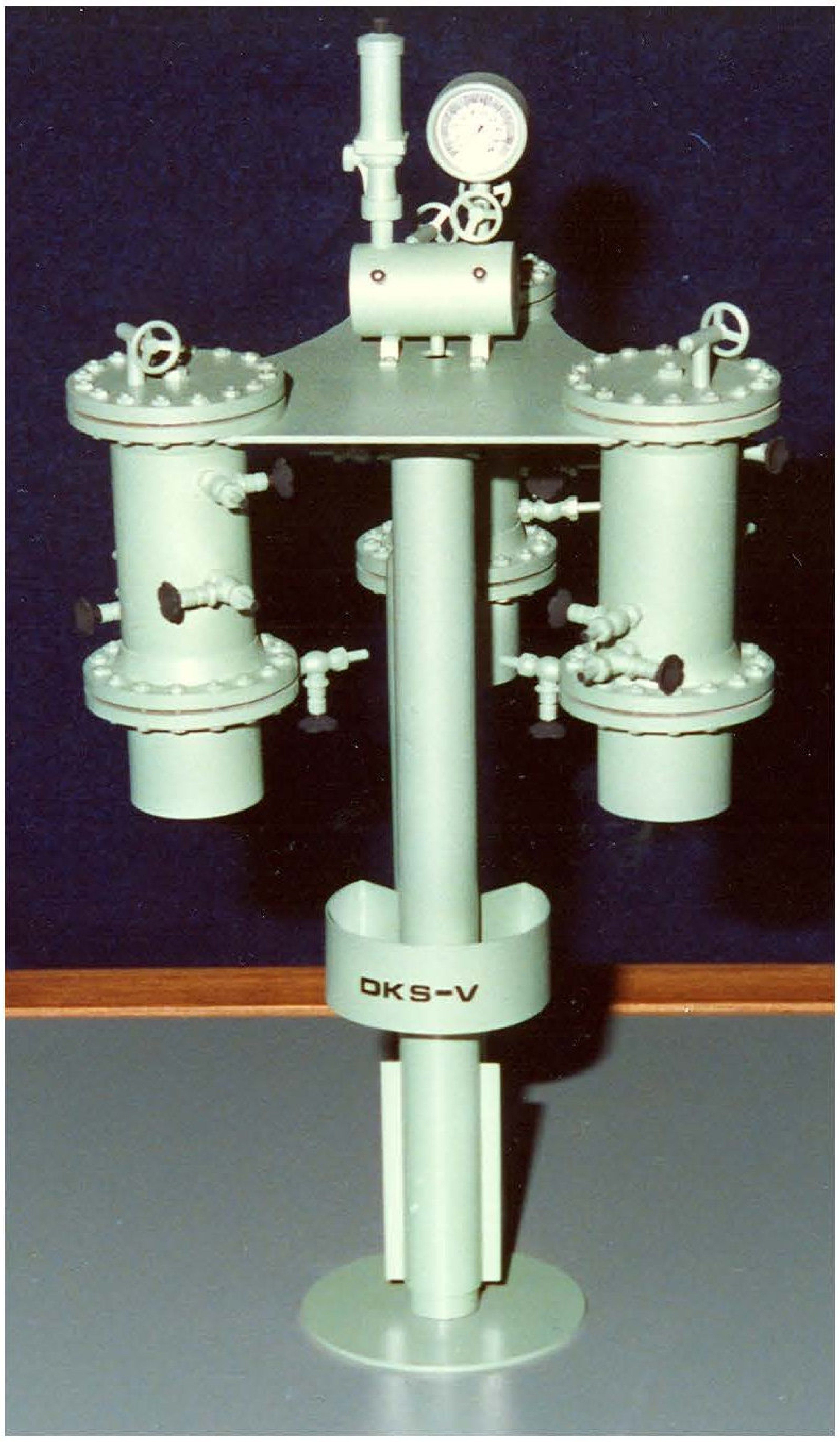
A vízzáróság vizsgálattal kapcsolatban érdemes felidézni *Pogány Béla* (krakkói műszaki egyetemi tanár) 1957-ben megjelent könyvének két ábráját, amelyeken látni, hogy – ellentétben egykori hazai előírásainkkal és a mai európai vizsgálati szabvánnyal – a víznyomás a henger alakú próbatest teljes felületére hat, és ezért a vízáram egyenes irányú (*1. ábra*).



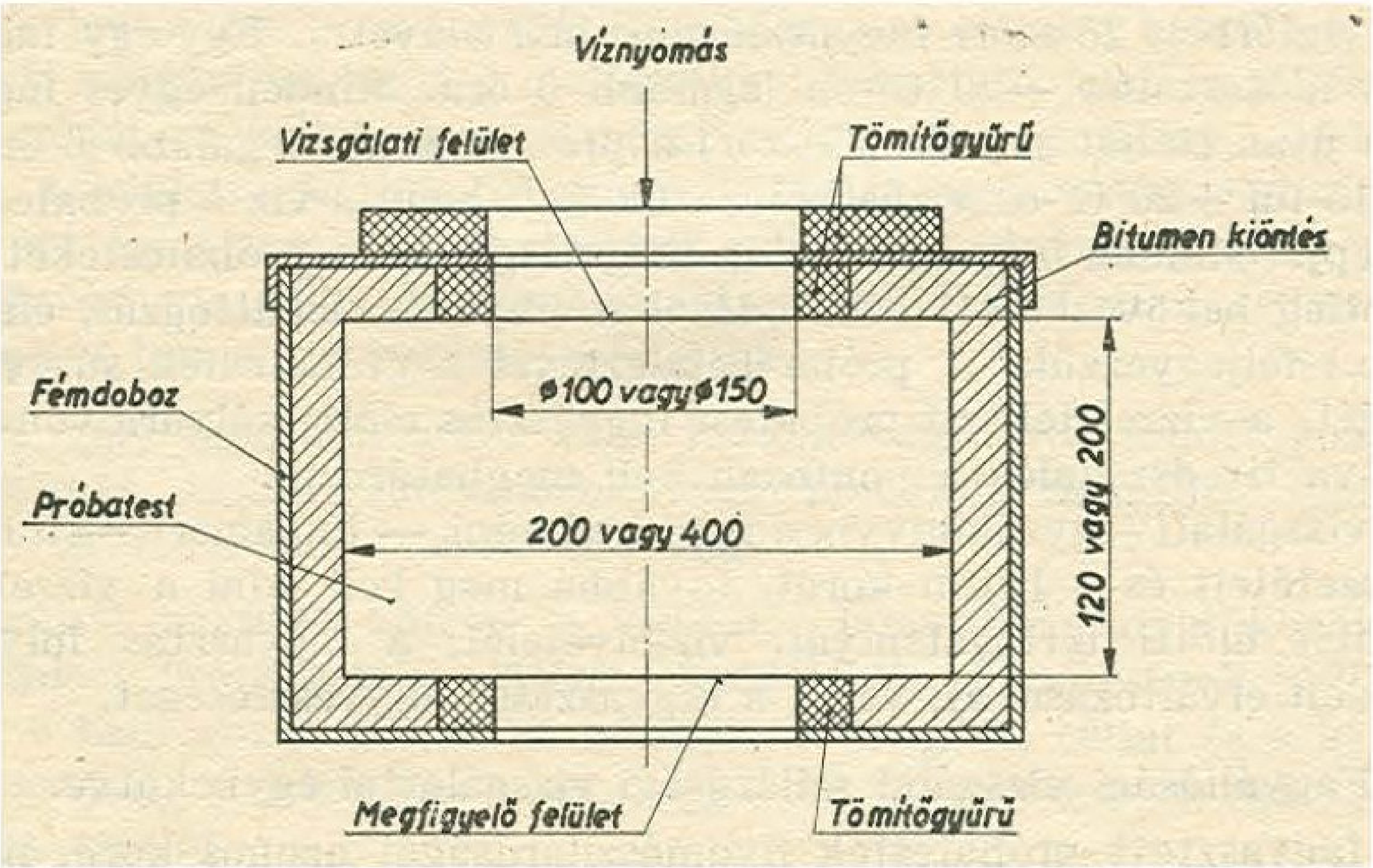


1. ábra: *Pogány Béla* vízzáróság vizsgáló berendezése (1957)

Dombi József az 1969-ben hasonló elven készített vízzáró berendezést, amelynek makettjét a *2. ábrán* mutatjuk be.



2. ábra: *Dombi József* vízzáróság vizsgáló berendezésének makettje (1969)



3. ábra: Vízzáróság vizsgálati próbatest helyzete az MSZ 4715:1955 és MSZ 4715:1961 szabvány szerinti vízzáróság vizsgáló berendezésben

A vízzáróságot egykor az MNOSZ 934:1949 és MNOSZ 934:1951, majd az MSZ 4715:1955 szabvány szerint vizsgálták. E szabványok szerint a 40 mm-nél nem nagyobb legnagyobb szemnagyságú betonok vízzáróság vizsgálatát 200·200·120 mm méretű próbatesteken végezték, ennél nagyobb legnagyobb szemnagyság esetén a próbatestek mérete 400·400·200 mm volt. A próbatest rendszerint álló helyzetben készült, fekvő helyzetben akkor készítették, ha az építménynél fellépő víznyomás iránya a beton bedolgozásának irányával azonos. A 24 órás korban kizsaluzott, vizsgálati oldalán drótkefével felérdesített próbatestet legalább 28 napos korig (a vizsgálat megkezdéséig) nedves ruhával letakarva, 20±3 °C hőmérsékleten, léghuzatmentes helyen tárolták. Ha az építmény betonjának tárolási körülményei eltértek ettől az előírástól (pl. hőszilárdítás esetén), akkor az építménynél alkalmazott módon kezelték és tárolták a próbatesteket. A vizsgálat megkezdése előtt a próbatestet fémdobozba helyezték, a próbatest és a doboz fala közötti hézagot tömítették (*3. ábra*). A víznyomást a kis próbatesten 100 mm átmérőjű, a nagy próbatesten 150 mm átmérőjű körfelületen működtették. A próbatestet 48 órán át 1 att, ezt követően 24 órán át 3 att, és további 24 órán keresztül 7 att víznyomásnak vetették alá (hasonlóan az akkori DIN 1048 szabvány előírásához). Szükség esetén további nyomásfokozatot is előírhattak. Ezeket a nyomásfokozatokat az MSZ 4715:1955 szabvány (és az előzmény szabványok) eredeti előírását érvénytelenítve a később megjelent MSZ 4719:1958 szabványban 1 att, 2 att, 4 att, 8 att nyomásfokozatra változtatták, de ezt a változást az MSZ 4715:1961 szabványba érdekes módon nem vezették át, hanem abban továbbra is az 1 att, 3 att, 7 att víznyomásról intézkedtek. Az MSZ 4715 szabvány 1961 évi kiadása a vízzáróság tekintetében az 1955 évi

kiadással, sőt az MNOSZ 934:1949 és MNOSZ 934:1951 szabvánnyal szinte szó szerint megegyezik. Az MNOSZ 934:1949, MNOSZ 934:1951, MSZ 4715:1955 és MSZ 4715:1961 szabvány szerinti vizsgálattal azt a víznyomást határozták meg, amelynél a megfigyelő felületen nedvesség mutatkozott, és vízáteresztés esetén minden nyomási fokozatban mérték az átszivárgott vízmennyiséget g/cm^2-ben. Ha a beton vízzáróságának megállapítása egy előírt nyomásfokozatra vonatkozott, akkor az előírt víznyomásnak 48 óráig alávetett próbatestet kettétörve megmérték a vízbehatolás mélységét.

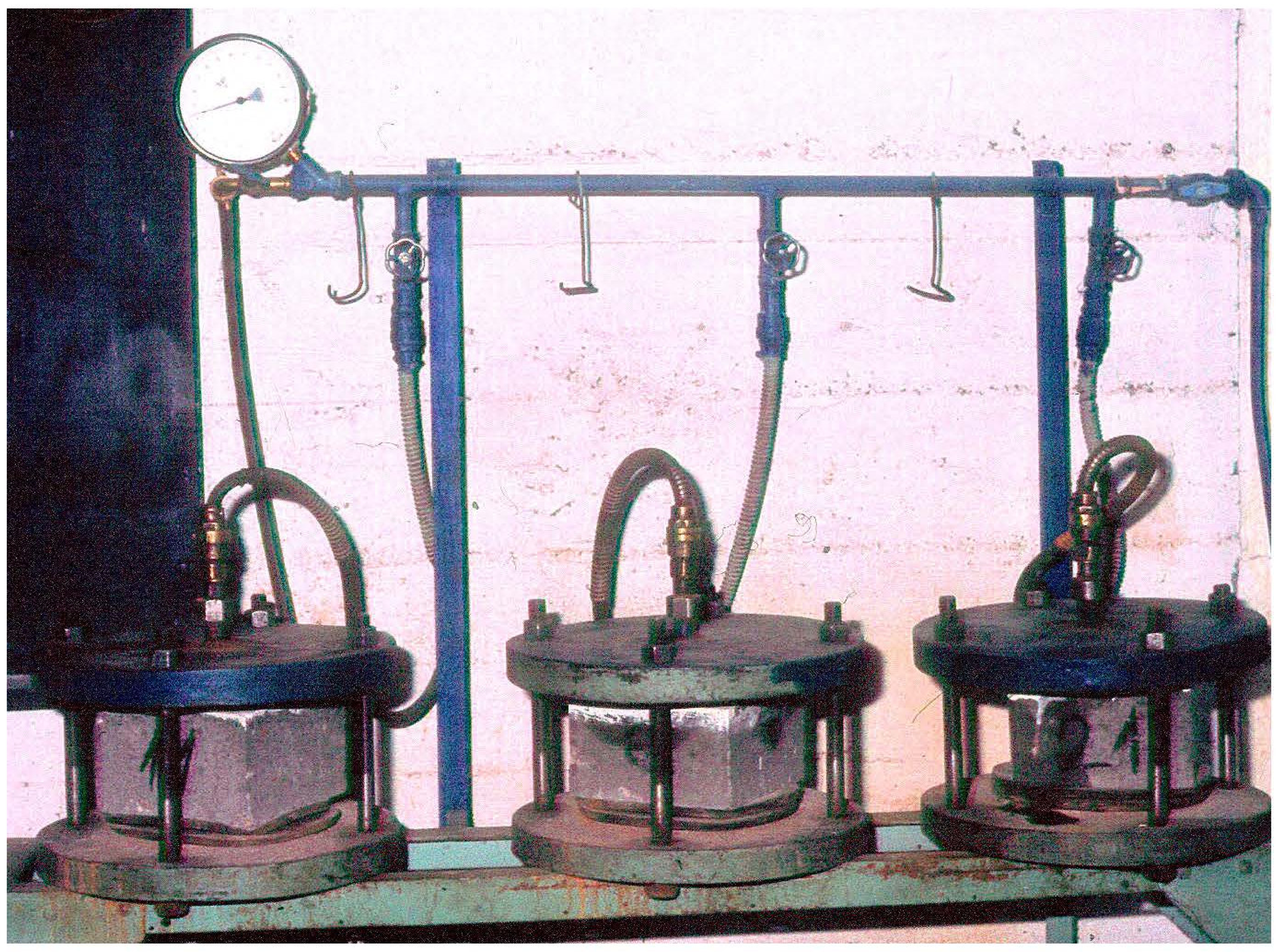
Érdekes az MSZ 4720:1961 szabvány előírása, amely szerint három próbatest vizsgálatával 50 m^3 betonkeveréket minősítettek. Ha a vízzáró szerkezet vastagsága nem volt nagyobb, mint 40 cm, akkor a vízzárósági osztályt a legkevésbé vízzáró próbatest vizsgálati eredményéből, ha nagyobb volt és a vizsgálati eredmények legfeljebb ± 20 %-kal tértek el az átlagtól, akkor a vízzárósági osztályt a vizsgálati eredmények átlagából határozták meg.

A megszilárdult beton vizsgálatára vonatkozó MSZ 4715:1961 szabványt mintegy tíz év múlva váltotta fel az MSZ 4715-3:1972 szabvány. A vízzáróság vizsgálata az MSZ 4715-3:1972 szabvány szerint lényegében azonos az MSZ 4715:1961 szabványban leírt módszerrel, de az MSZ 4715-3:1972 szabvány a legfeljebb 32 mm legnagyobb szemnagyságú betonok esetére a 200·200·120 mm méretű próbatesteken kívül megengedte a 150 mm átmérőjű és 120 mm magas próbahengerek, a 32 mm-nél nagyobb legnagyobb szemnagyság esetére a 300·300·150 mm méretű próbatestek és a 250 mm átmérőjű és 150 mm magas próbahengerek vizsgálatát is. A próbatesteket a korábbi előírásokkal ellentétben nem helyezik fémdobozba, hanem két fej közé szorították (*4.* és *5. ábra*).

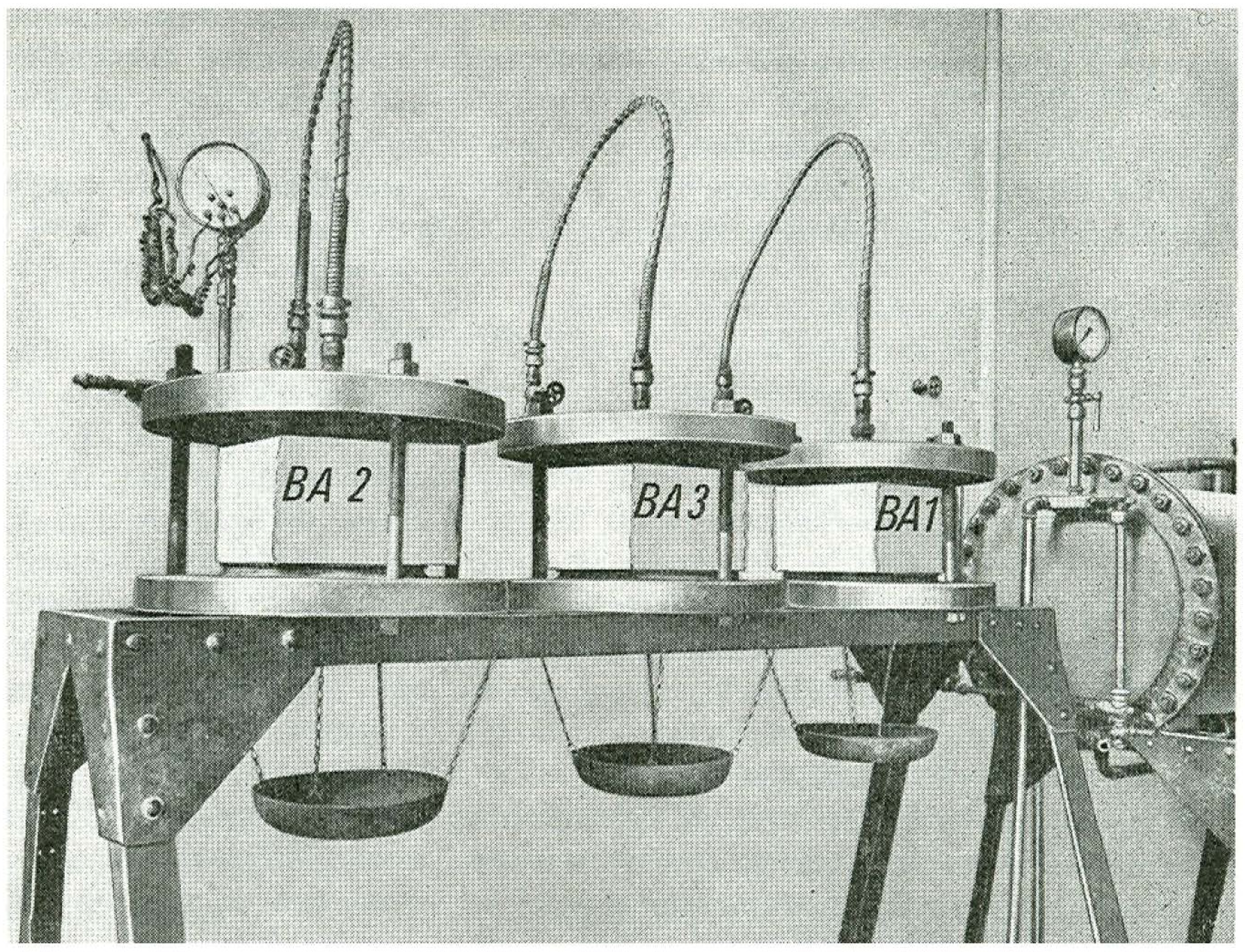
Az MSZ 4715-3:1972 szabvány szerint – követve az MSZ 4719:1958 szabványban előírtakat – „a próbatesteket 48 órán át 10 N/cm^2 (1 bar ~ 1 att), ezt követően 24 óránként – a nedves folt megjelenéséig – megkétszerezve 20, 40, 80, 160 N/cm^2 (2, 4, 8, 16 bar) túlnyomásnak kell alávetni. Az előírt nyomásfokozatokat – a nyomókamrában mérve – ± 3% pontossággal kell betartani.

Óránként ellenőrizni kell a vízfogyasztást, és meg kell vizsgálni, hogy a próbatest alsó felületén észlelhető-e nedves folt.

A nedves folt megjelenésekor az alsó gyűjtőedényt, ha az eddig nem volt felszerelve, vízzáróan a próbatest vízzáró burkához kell rögzíteni. A nedves folt megjelenésekor ható nyomást további 24 órán át kell működtetni, és a vízfogyasztást a nedves folt megjelenésétől számított 2, 6, 12, 18 és 24 óra múlva kell a vízmérőkön leolvasni.”



4. ábra: MSZ 4715-3:1972 szabvány szerinti vízzáróság vizsgáló berendezés



5. ábra: Vízzáróság vizsgáló berendezés fényképe *Palotás László*: „Mérnöki szerkezetek anyagtana” c. könyvének 3. kötetében (1980)

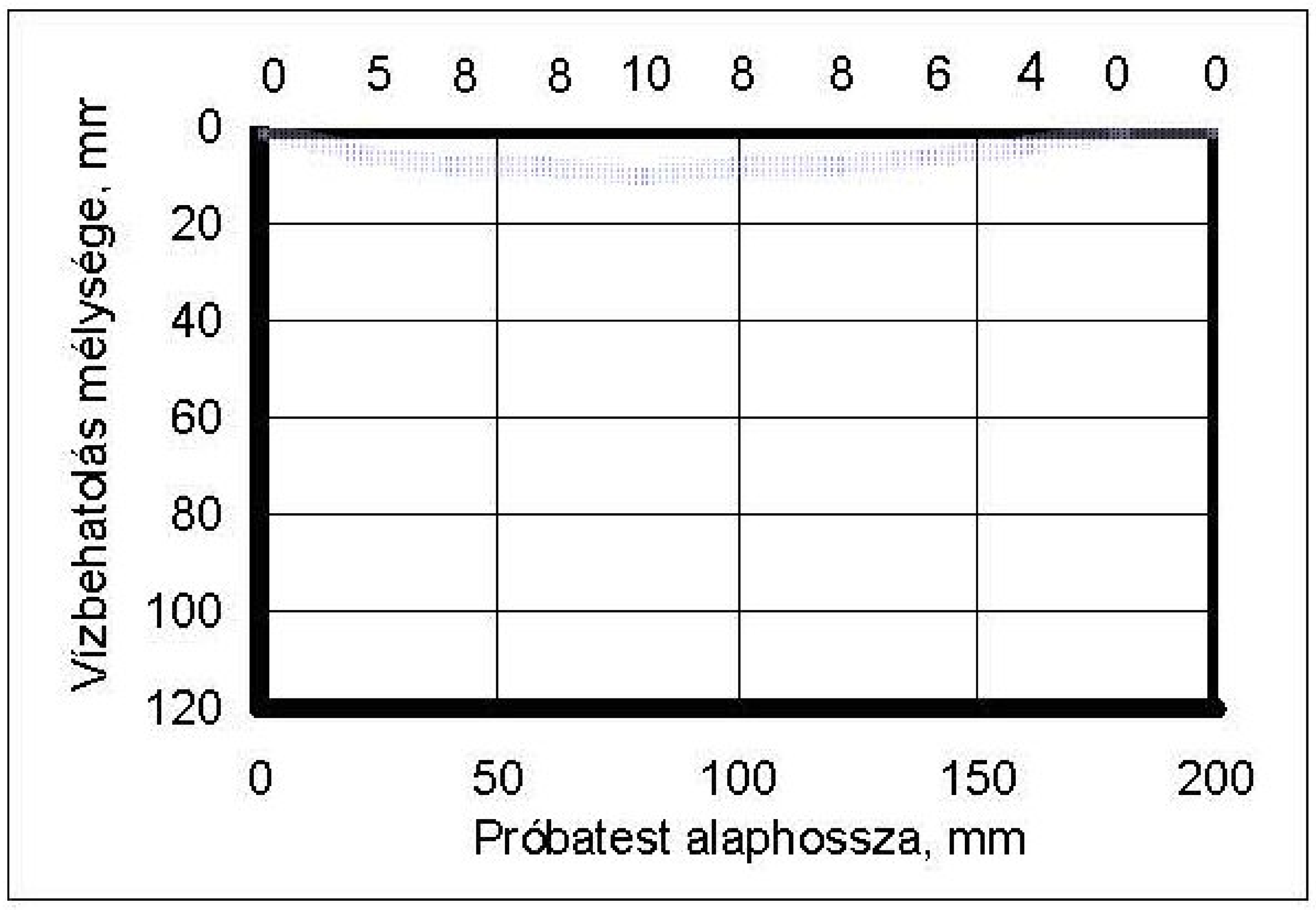
Az MSZ 4715-3:1972 szabvány szerint „a vizsgálat befejezése után az alsó vízgyűjtő

edényben levő vizet a próbatest alsó felületéről hozzácseppentett vízcseppekkel együtt 0,1 g pontosságra kell megmérni.

A próbatestet a vizsgálat után a víznyomás irányával párhuzamosan (lehetőleg középen) azonnal el kell hasítani az MSZ 4715-4:1972 szerint. Meg kell figyelni a hasított felületen a próbatest belsejének állapotát és a nedvesített felület alakját.

Ha a vizsgálat folyamán a legnagyobb nyomásfokozatnál sem keletkezett vízátszivárgás, akkor ezt a fokozatot 24 órán át kell működtetni a próbatestre, azután az előző bekezdésben leírtaknak megfelelően el kell hasítani és meg kell határozni a nedvesített felület alakját és nagyságát.”

Az MSZ 4719:1982 szabvány melléklete a vízzáróság vizsgálatot az MSZ 4715-3:1972 szabványhoz nagyon hasonlóan szabályozta. A próbatesteket 48 órán át 1 bar, ezt követően 24 órán át 2 bar, majd 24 órán át az előírt vízzárósági fokozatnak megfelelő nyomáson (4 bar, 6 bar vagy 8 bar) kellett tartani. Az előírt víznyomás fokozaton a vízbehatolás mértéke egyik próbatesten sem érhette el a 40 mm-t. A próbatestet a vízzáróság vizsgálat után azonnal, a víznyomás irányával párhuzamosan, lehetőleg középen el kellett hasítani, és a vízbehatolás legnagyobb mélységének mm pontosságú megmérésén kívül fel kellett rajzolni a nedvesített felület alakját (*6. ábra*). Ha a próbatest vizet engedett át, akkor ketté kellett hasítani, és ha az átszivárgást durva hiba okozta, akkor a vizsgálati eredményt figyelmen kívül kellett hagyni.



6. ábra: A vízbehatolás mélységének rajza

7. ábra: Korszerű vízzáróság vizsgáló berendezés a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék laboratóriumában

Az MSZ 4715-3:1972 szabvány és az MSZ 4719:1982 szabvány melléklete szerinti vízzárósági vizsgálatot MSZ EN 12390-8:2001 (ma MSZ EN 12390-8:2009) szabvány szerinti vizsgálat váltotta fel (*7. ábra*).

A beton vízzáróságát az MSZ EN 12390-8:2009 szabvány szerint, legalább 28 napos korú, kizsaluzástól végig víz alatt tárolt próbatesten, 75 mm átmérőjű körfelületen 72 ± 2 órán át ható 5 bar (0,5 ± 0,05 N/mm^2) állandó víznyomáson kell vizsgálni. A próbatest víznyomásra merőleges, tehát vizsgált oldalának hossza vagy átmérője legalább 150 mm, magassága legalább 100 mm legyen, következésképpen az európai vízzáróság vizsgálatot a

Magyarországon szokásos 200·200·120 mm méretű próbatesten is el lehet (el szabad) végezni, de ugyanígy alkalmas a 150 mm élhosszúságú szabványos próbakocka is (MSZ 4798-1:2004).

Minthogy a víznyomásnak kitett felület átmérője megközelítőleg fele akkora kell legyen, mint a próbatest víznyomásra merőleges mérete, következik, hogy ha a próbatest mérete 200·200·120 mm, akkor 100 mm átmérőjű körfelületen is szabad az 5 bar víznyomást alkalmazni, de ebben az esetben a vizsgálati jegyzőkönyvben a próbatest méretét és a vízzel nyomott körfelület átmérőjét is meg kell adni (MSZ 4798-1:2004).

A próbatest víznyomásnak kitett felületét közvetlenül a kizsaluzás után drótkefével fel kell érdesíteni.

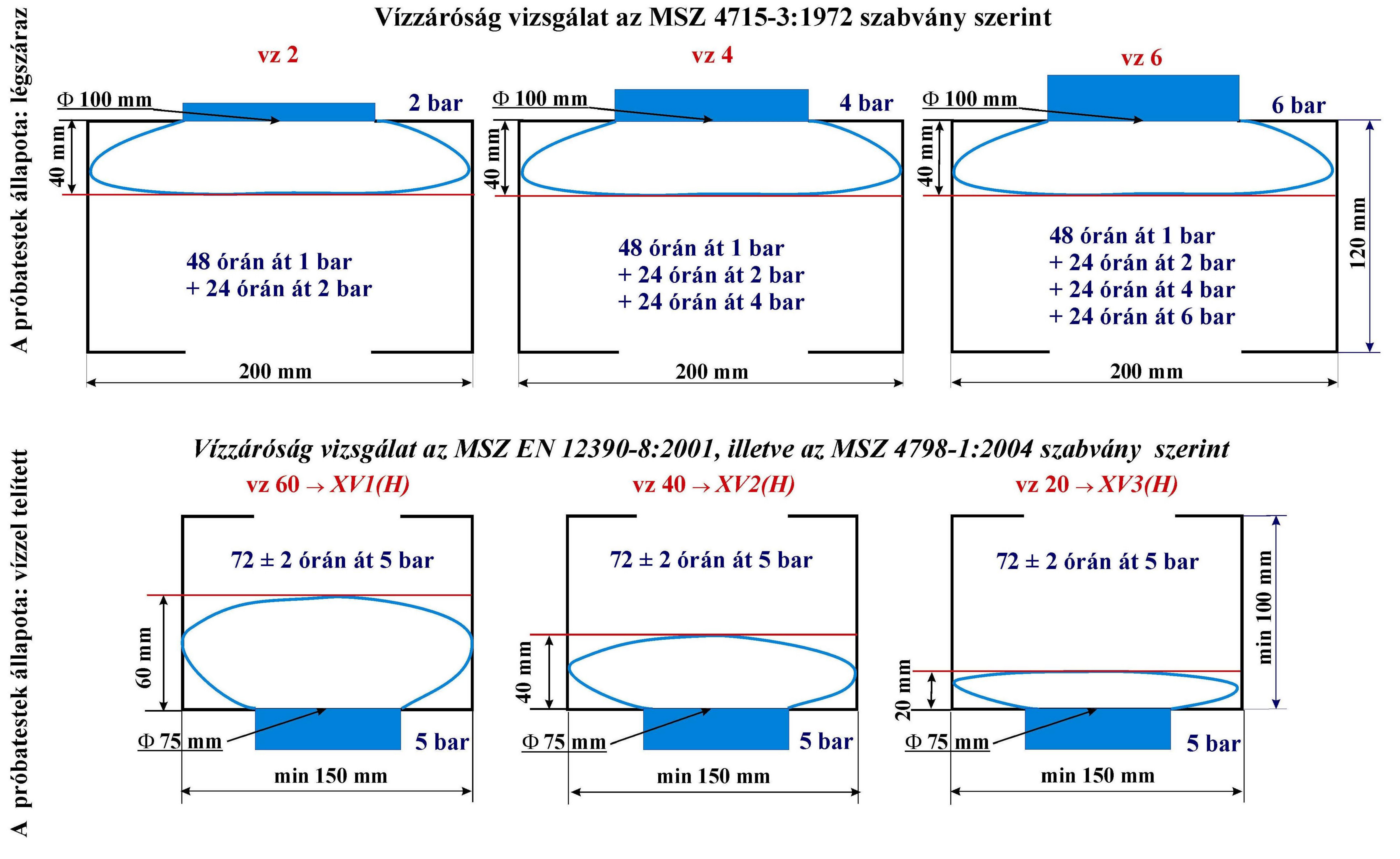
Az MSZ 4798-1:2004 szerint Magyarországon szabad a vízzárósági próbatestet vegyesen, azaz a kizsaluzástól 7 napos korig víz alatt, utána laborlevegőn tárolni - ha ebben előzetesen írásban megállapodás születik -, de ebben az esetben a vizsgálati jegyzőkönyvben a tárolás módját (vegyesen tárolva) is meg kell adni. A végig víz alatt tárolt próbatesteken – a vegyesen tároltakéhoz képest – a jobb hidratáció és a kisebb zsugorodás folytán kisebb vízbehatolási mélység várható. Ha a beton a homogén cementnél lassabban szilárduló heterogén cementtel készül, akkor a végig víz alatt tárolt próbatestek vizsgálati eredményeit ajánlott mértékadónak tekinteni.

A vízzáróság vizsgáló berendezésbe a próbatestet a víznyomásnak kitett felületével lefele kell elhelyezni, így jól megfigyelhető, ha a felső felületen víz jelenik meg.

Közvetlenül a vizsgálat végén a berendezésből kivett próbatest víznyomásnak kitett oldalát le kell itatni, és a próbatestet a víznyomásnak kitett felületére fektetve függőlegesen ketté kell hasítani. Miután a hasított felület annyira megszikkadt, hogy a vízbehatolás határát jól meg lehet figyelni, a legnagyobb vízbehatolás mértékét mm pontossággal meg kell mérni.

A vízzáróság vizsgálathoz 100 m^3 beton-térfogatonként legalább 1 db, de tételenként legalább 3 db próbatestet kell készíteni és a tétel jellemzésére értékelni.

A vízzáróság fogalmának és vizsgálatának régi és új értelmezését a *8. ábrán* vetjük össze.



8. ábra: A vízzáróság fogalmának és vizsgálatának régi (MSZ 4715-3:1972) és új (MSZ EN 12390-8:2001, illetve MSZ EN 12390-8:2009) értelmezése.

A vízzáróság vizsgálatát Németországban *Otto Graf* és *Alfred Hummel* idejében az akkor érvényes a DIN 1048 szabvány („Bestimmungen für Betonprüfungen bei Ausführung von Bauwerken aus Beton und Stahlbeton") szerint, azt megelőzően a DIN Vornorm 4029 előszabvány („Richtlinien für die Prüfung von Beton auf Wasserdurchlässigkeit") szerint végezték. Később a DIN 1048-1:1978 szabvány volt érvényes, amely szerint a vízzáróságot általában 28 napos korú, 200·200·120 mm méretű próbatesten vagy Ø150·120 mm méretű próbakorongon vagy 200 mm méretű próbakockán, esetleg 300 mm méretű próbakockán vagy 300 mm alapélű vagy átmérőjű, a legnagyobb szemnagyság négyszeresének megfelelő magasságú próbatesten vizsgálták. Kizsaluzás után a víznyomásnak kitett általában 100 mm átmérőjű, a 300 mm méretű próbatestek esetén 150 mm átmérőjű körfelületet drótkefével feldurvították, a felület körfelületen kívüli részét kétrétegű cementpéppel simították le, majd a próbatestet víz alatt tárolták. A vizsgálat során 48 órán át 1 bar, azután 24 órán át 3 bar, majd újabb 24 órán át 7 bar víznyomást alkalmaztak. Vizsgálati eredmény a három próbatesten mért legnagyobb vízbehatolás mélységének átlaga volt.

A napjainkban is érvényes német DIN 1048-5:1991 szabvány szerint a vízzáróságot 32 mm legnagyobb szemnagyságig általában 3 darab, 200·200·120 mm méretű próbatesten vagy 200 mm méretű próbakockán vagy Ø150·120 mm méretű próbakorongon vizsgálják. A vizsgálatot akkor szabad 150·150·120 mm méretű próbatesten vagy 150 mm méretű próbakockán végezni, ha a próbatest legkisebb mérete a legnagyobb szemnagyságnak legalább négyszerese. Ha a legnagyobb szemnagyság 32 mm-nél nagyobb, akkor a próbatest alapéle, illetve átmérője 300 mm, magassága legalább 120 mm, illetve a legnagyobb szemnagyságnak legalább négyszerese. A víznyomás a 150 mm vagy 200 mm alapélű, illetve átmérőjű próbatestet 100 mm átmérőjű körfelületen, a 300 mm alapélű, illetve átmérőjű próbatestet 150 mm átmérőjű körfelületen terheli. A próbatestet kizsaluzás után – miután vizsgálati körfelületét drótkefével felérdesítették – azonnal (20±2) °C hőmérsékletű víz alá helyezik, majd legalább 28 napos, de 35 napnál nem idősebb korában, *nedves állapotban*, 3 napon át 0,5 N/mm^2 (5 bar) víznyomással terhelik. Közvetlenül a vizsgálat után a próbatestet elhasítják, és 5-10 perc száradási idő után meghatározzák a nedvesített felület alakját, továbbá a legnagyobb vízbehatolás mélységét mm pontosan. Vizsgálati eredmény a három próbatesten mért legnagyobb vízbehatolás mélységének átlaga.

Németországban a beton folyadékzáróságát a „DAfStb Wassergefährdende Stoffe" irányelv „A.2" melléklete szerint, a szálerősítésű betonét az „A.3" melléklete szerint, a megrepesztett betonét az „A.5" melléklete szerint kell vizsgálni. A vizsgálathoz 320 kg/(beton m^3) CEM I 32,5 R vagy CEM III/A 32,5 cement-tartalmú, 0,5 víz-cement tényezőjű referencia beton próbatestet is készítenek. A betonból 3 db 150 mm méretű próbakockát kell készíteni, műanyag-fóliába csomagolva 20 °C hőmérsékleten kell tárolni, majd a próbakockákból 7 napos korban 80 mm vagy 100 mm átmérőjű, 120 mm magas hengert kell kifúrni. A hengert 56 napon át 20 °C hőmérsékletű, 65 % relatív páratartalmú klímatérben kell tárolni. A repedés nélküli próbahengert szoros illesztéssel fémhengerbe ragasztják, felső körlapjára 500 mm hosszú, skálával ellátott vizsgálócsövet ragasztanak, amelyet 400 mm magasan vizsgálati folyadékkal feltöltenek. A folyadék feltöltése után 72 órával a próbahengert a fémhengerből kiszabadítják, elhasítják, és a folyadékbehatolás mélységét meghatározzák. A mesterségesen megrepesztett próbatest folyadékbehatolásának mélységét általában 0,10 mm-re és 0,25 mm-re beállított repedéstágasság mellett mérik.

A repedések injektálására szolgáló anyag alkalmasságának vizsgálati módszerét az MSZ EN 14068:2004 szabvány írja le. A vizsgálathoz MSZ EN 1766:2000 szerinti referenciabetonból (150 ± 2) mm átmérőjű, (100 ± 2) mm magas próbahengert kell készíteni, hosszában ketté kell hasítani, a két félhengert távolságtartóval (1 ± 0,2) mm széles hézagot képezve egymáshoz rögzíteni kell, a hézagot a palástmentén szigetelni kell, és a próbatestet forró elasztomerbitumennel körbeöntve a vizsgáló formába kell helyezni. A próbatestet (48 ± 4) órán át (21 ± 2) °C hőmérsékleten és (60 ± 10) % relatív páratartalom mellett klimatizálni kell, de a repedés lehet nedves vagy vizes vagy vízzel teli. A hézagot ki kell

injektálni, a próbatestet 7 napon át (21 ± 2) °C hőmérsékleten és (60 ± 10) % relatív páratartalom mellett kell tárolni. A víznyomást alulról felfelé 7-7 napig kell a próbatestre a legnagyobb nyomás 25, 50, 75 és 100 %-os fokozatán működtetni. Ha a 25 és 50 %-os fokozaton szivárgás jelentkezik, akkor az injektáló anyag a vizsgálatot nem állta ki.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A vízzáróság vizsgálat régi (MSZ 4715-3:1972) és új (MSZ EN 12390-8:2009) módszere közötti legfőbb különbség, hogy szemben a régi eljárással, ma a vízzáróságot általában végig víz alatt tárolt próbatesten (Magyarországon – ha ebben előzetesen írásban megállapodás születik – szabad a vízzárósági próbatestet vegyesen, azaz 7 napos korig víz alatt, utána laborlevegőn tárolni), 75 mm átmérőjű körfelületen 72 ± 2 órán át ható 5 bar (0,5 ± 0,05 MPa) állandó víznyomáson kell vizsgálni. A beton vízzárósága a tárolási módtól függetlenül akkor megfelelő, ha a vizsgálat eredményeként minden egyes próbatesten a vízbehatolás mélysége XV1(H) környezeti osztály esetén legfeljebb 60 mm; (jele: vz 60), XV2(H) környezeti osztály esetén legfeljebb 40 mm; (jele: vz 40), XV3(H) környezeti osztály esetén legfeljebb 20 mm; (jele: vz 20).

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetet mondanak a *Duna-Dráva Cement Kft*-nek a jelen tanulmány elkészítéséhez (a kutatás-fejlesztési projekt száma: 34488-003) nyújtott anyagi támogatásért.

6. HIVATKOZOTT SZABÁLYZATOK, SZABVÁNYOK, MŰSZAKI ELŐÍRÁSOK

Határozatok (1909), „Határozatok a trasznak szállítására és megvizsgálására”, *Magyar Mérnök- és Építész-Egylet* (lásd Lampl – Sajó 1914)

Sajó-feltételek (1913), „A Sajó folyó tiszai torkolatától Miskolczig terjedő szakaszán vállalati úton letesítendő csatornázási munkálatokra vonatkozó részletes építési feltételek”, *Földmívelésügyi Minisztérium* (lásd Lampl – Sajó 1914)

MNOSZ 934:1949 „Beton és alapanyagainak vizsgálata”

MNOSZ 934:1951 „Beton és alapanyagainak vizsgálata”

MSZ 4715:1955 „Megszilárdult beton vizsgálata”

MSZ 4715:1961 „Megszilárdult beton vizsgálata”

MSZ 4715-3:1972 „Megszilárdult beton vizsgálata. Hidrotechnikai tulajdonságok”

MSZ 4715-4:1972 „Megszilárdult beton vizsgálata. Mechanikai tulajdonságok roncsolásos vizsgálata”

MSZ 4719:1958 „A betonok fajtái és jelölésük”

MSZ 4719:1982 „Betonok”

MSZ 4720:1961 „A betonok minőségi követelményei és minősítésük”

MSZ 4737-1:2002 „Különleges cementek. 1. rész: Szulfátálló cementfajták”

MSZ 4798-1:2004 „Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőség. Az MSZ EN 206-1 és alkalmazási feltételei Magyarországon”

MSZ 15033:1964 R „Beton- és vasbeton terminológia”

MSZ 18288-2:1984 „Építési kőanyagok szemszerkezeti és szennyeződési vizsgálata. Szemmegoszlás vizsgálata ülepítéssel”

ME-19-63:1964 „Műszaki előírás beton és vasbeton készítésére”

MÉASZ ME-04.19:1995 „Beton és vasbeton készítése. 8. fejezet. Vízzáró betonok”. Műszaki előírás

MSZ EN 197-1:2000 „Cement. 1. rész: Az általános felhasználású cementek összetétele, követelményei és megfelelőségi feltételei”

MSZ EN 206-1:2002 „Beton. 1. rész: Műszaki feltételek, teljesítőképesség, készítés és megfelelőség"
MSZ EN 934-2:2009 „Adalékszerek betonhoz, habarcshoz és injektálóhabarcshoz. 2. rész: Betonadalékszerek. Meghatározások, követelmények, megfelelőség, jelölés és címkézés". Előzményei: MSZ EN 934-2:2002 és MSZ EN 934-2:2001/A2:2006
MSZ EN 1766:2000 „Termékek és rendszerek a betonszerkezetek védelmére és javítására. Vizsgálati módszerek. Referenciabetonok vizsgálathoz"
MSZ EN 1992-1-1:2005 „Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése. 1-1. rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok"
MSZ EN 12350-7:2000 „A friss beton vizsgálata. 7. rész: Légtartalom. Nyomásmódszerek"
MSZ EN 12390-8:2009 „A megszilárdult beton vizsgálata. 8. rész: A vízzáróság vizsgálata"
MSZ ENV 13670-1:2000 „Betonszerkezetek kivitelezése. 1. rész: Általános előírások"
MSZ EN 14068:2004 „Termékek és rendszerek a betonszerkezetek védelmére és javítására. Vizsgálati módszerek. A betonban lévő kiinjektált, nem mozgó repedések vízzáróságának meghatározása"
DIN 1045-1:2008 „Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion"
DIN 1045-3:2008 „Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung"
DIN 1048-1:1978 „Prüfverfahren für Beton. Frischbeton, Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper"
DIN 1048-5:1991 „Prüfverfahren für Beton. Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper"
DAfStb WU-Richtlinie (2003), „Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton", *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Beuth Verlag GmbH, Berlin
„Erläuterungen zur DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton" (2006), *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 555., Beuth Verlag GmbH, Berlin
DAfStb Wassergefährdende Stoffe (2004), „Richtlinie für Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen", *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Beuth Verlag GmbH, Berlin

7. HIVATKOZÁSOK

Blessing, E. (2008), „Ausführung, Instandhaltung und Sanierung mit Beschichtungssystemen", Gewässerforum in Hildesheim
Dombi J. (1969), „Vízzáró beton", *SZIKKTI 29. sz. tudományos közleménye*, ÉTK. Budapest
Freimann, Th. (2006), „Wasserundurchlässige Betonbauwerke", *Zement Merkblatt Hochau, Beton,* www.vdz-online.de
Graf, O. (1950), „Die Eigenschaften des Betons. Versuchsergebnisse und Erfahrungen zur Herstellung und Beurteilung des Betons", *Springer Verlag OHG*, Berlin/Göttingen/Heidelberg
Hajós György (2004), „Zielinski Szilárd", *Logod Bt.*, Budapest
Hummel, A. (1959), „Das Beton-ABC. Ein Lehrbuch der Technologie des Schwerbetons und des Leichtbetons" 12. kiadás. *Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn*, Berlin
Kausay T. (2009), „Betonok környezeti osztályai", *Beton*, XVII. évf. 7-8. szám, pp. 3-8.
Lampl H. – Sajó E. (1914), „A beton", *Pátria Irodalmi Vállalat és Nyomdai Részvénytársaság,* Budapest
Lohmeyer, G. – Ebeing, K. (2009), „Weiße Wannen einfach und sicher", *Verlag Bau+Technik GmbH*, Düsseldorf
Mörsch, E. (1908), „Der Eisenbetonbau, seine Theorie und Anwendung", *Verlag von Konrad Wittwer*, Stuttgart
Mihálik J. (1860), „Praktische Anleitung zum Béton-Bau für alle Zweige des Bauwesens", Zweite Auflage. *Theobald Grieben,* Berlin

Nendtvich (máshol Nendtwich) G. (1889), „A hydraulikus kötőanyagok és a hazai cementek és cementgyárak”, *Magyar Mérnök- és Építész-Egylet Közlönye*, pp. 89-105.

Palotás L. (1952), „Minőségi beton”, *Közlekedés- és Mélyépítéstudományi Könyv- és Folyóiratkiadó Vállalat*, Budapest

Palotás L. (1959), „Építőanyagok I.”, *Akadémiai Kiadó*, Budapest

Palotás L. (1961), „Építőanyagok II.”, *Akadémiai Kiadó*, Budapest

Palotás L. (1979), „Mérnöki szerkezetek anyagtana 1. Általános anyagismeret”, *Akadémiai Kiadó*, Budapest

Palotás L. – Balázs Gy. (1980), „Mérnöki szerkezetek anyagtana 3. Beton-Habarcs-Kerámia-Műanyag”, *Akadémiai Kiadó*, Budapest

Pogány B. (1957), „A nagyszilárdságú beton néhány problémája”, *Akadémiai Kiadó*, Budapest

Springenschmid, R. (2007), „Betontechnologie für die Praxis”, *Bauwerk Verlag GmbH*, Berlin

Dr. Balázs L. György (1958) okl. építőmérnök, okleveles mérnök, matematikai szakmérnök, PhD, Dr. habil, egyetemi tanár, a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék vezetője. Fő érdeklődési területei: beton, vasbeton és feszített vasbeton szerkezetek (anyagai, laboratóriumi vizsgálata és modellezése), szálerősítésű betonok (FRC), nem acélanyagú (FRP) betétek, megerősítések anyagai és módjai, erőátadódás betonban, vasbeton tartó repedezettségi állapota, vasbetonszerkezetek tartóssága. *A fib TG 4.1* „Használhatósági határállapotok" munkabizottság elnöke, további *fib, ACI* és *RILEM* bizottságok tagja. *A fib* Magyar Tagozat elnöke.

Dr. Kausay Tibor (1934) okl. építőmérnök (1961), vasbetonépítési szakmérnök (1967), egyetemi doktor (1969), a műszaki tudomány kandidátusa (1978), Ph.D. (1997), címzetes egyetemi docens (1985), címzetes egyetemi tanár a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszéken (2003). A *fib* Magyar Tagozat tagja (2000). Az MTA Szabolcs-Szatmár-Bereg Megyei Tudományos Testületének gróf Lónyay Menyhért emlékérmes tiszteletbeli tagja (2003). Tevékenysége a betontechnológiai és a kő- és kavicsipari kutatásra, fejlesztésre, szakértésre, oktatásra, szabványosításra terjed ki. Publikációinak száma mintegy 175.

Zúzottkavics adalékanyagú betonok szilárdsága

KAUSAY TIBOR
Szilikátipari Központi Kutató és Tervező Intézet, Budapest

Bevezetés

A zúzottkőbetonok tulajdonságainak tanulmányozása [1] után a *Kavicsbánya Vállalat* megbízásából azért foglalkoztunk a zúzottkavics betonszilárdságra gyakorolt hatásával, mert vannak kavicsbánya üzemek, amelyekben a legalább 90 tömeg %-ban tört szemekből álló ún. tört termékek mellett a zúzottkavicsot 10–90 tömeg %-ban tartalmazó ún. vegyes termékek az össztermelésnek mintegy egyharmadát teszik ki. A témakör nemcsak betontechnológiai szempontból tarthat érdeklődésre számot, hanem azért is, mert a méreten felüli szemek aprítása folytán a vegyes termékek előállítása költséges, és értékesítése nem feltétlenül ezzel arányos áron történik, holott beton-adalékanyagkénti használati értéke a csak osztályozott terméknél magasabb.

A zúzottkavics hatásának tanulmányozására összehasonlító beton kísérleteket végeztünk. E célra a natur homokos kavicsot és a zúzottkavicsot a Kavicsbánya Vállalat a Nyékládházi Üzemből bocsátotta rendelkezésünkre. Vizsgálataink alapján az MSZ 18293–79 szabvány szerint a natur homokos kavics EHK 32-II.-P-TT minőségű, a zúzottkavics ZK 8/16–C-k minőségű volt.

A téma felvázolásáért és a tanulmány kidolgozása során nyújtott segítségéért köszönetet mondunk *Szabó Miklós* műsz. igazgatóhelyettesnek, *Balla Károly* csoportvezetőnek és *Gimpel Pál* termelési előadónak.

Betonkísérletek

A kísérleti adalékanyagokat 0/8, 8/16 és 16/ 24 mm szemnagyságú frakciókra bontottuk, és szemmegoszlásukat az *1. táblázatban* tüntettük fel. Külön a natur kavics és külön a zúzottkavics 8/16 és 16/24 mm-es frakciókat 3 : 1 tömegarányban összekevertük. A kísérleti beton-adalékanyagot a 0/8 mm-es osztályozott homokos kavics, a 8/24 mm-es osztályozott kavics és a 8/24 mm-es zúzottkavics frakciókból állítottuk össze a *2. táblázat* szerinti keverési arányban. E kísérleti keverékek szemmegoszlása az *1. táblázat* utolsó oszlopa szerinti, minőségi jele *EHK* vagy *VEHK 24-I*, aszerint, hogy az zúzottkavicsot nem tartalmaz vagy tartalmaz.

A kísérleti betonok MSZ 4719-82 szerinti várható nyomószilárdsági osztályát *C 25* (B 350) és *C 16* (B 200) értékűnek választottuk. A nyomószilárdsági

osztályok mindegyikéhez háromféle, azaz *FN* földnedves, *KK* kissé képlékeny és *K* képlékeny konzisztenciát rendeltünk. A betonok összetételét az MI-04.19 – 85 műszaki irányelvben foglaltak alapján terveztük meg. A betonkeverékek főbb tervezési jellemzőit a *3. táblázat* tartalmazza.

A kétféle nyomószilárdsági osztály, háromféle konzisztencia és a négyféle adalékanyag összetétel kombinálásával 24 féle beton keveréket kaptunk, amelyek összetételét a *4. táblázatban* tüntettük fel.

A betonok készítése során kötőanyagként bélapátfalvi 450 pc cementet használtunk.

1. táblázat

A kiindulási, a frakcionált és a kísérleti keverék adalékanyagok szemmegoszlása

Megnevezés	Natur homokos kavics	0/8 mm homokos kavics	8/16 mm kavics	16/24 mm kavics	Zúzott kavics	0/8 mm zúzott hom. kavics	8/16 mm zúzott kavics	16/24 mm zúzott kavics	Kísérleti keverék
Minőségi jel	EHK 32 – II.	EHK 8 – II.	OK 8/16	OK 16/24	ZK 8/16	ZK 4/8	ZK 8/16	ZK 16/24	EHK vagy VEHK 24 – I.
Szemnagyság mm	összes áthullott anyag mennyisége, tömeg %								
0,063	0,7	1,2							0,7
0,125	1,2	2,0							1,2
0,25	4,8	8,0			0,0	0,0			4,8
0,5	16,0	26,7			0,1	1,5			16,0
1	29,0	48,4			0,2	3,1			29,0
2	36,6	61,1			0,4	6,2			36,7
4	46,3	77,3			0,6	9,2			46,4
8	59,9	100,0	0,0		6,5	100,0	0,0		60,0
16	87,7		100,0	0,0	92,4		100,0	0,0	90,0
24	96,4			100,0	98,0			100,0	100,0
32	100,0				100,0				
Részarány, tömeg %		59,9	27,8	8,7		6,5	85,9	5,6	
Finomsági modulus	6,18	4,75	8,00	9,00	8,00	6,80	8,00	9,00	6,15

2. *táblázat*

Adalékanyag frakciók keverési aránya

Keverék csoport jele	01.	02.	03.	04.
Frakció jele	Keverési arány, tömeg %			
EHK 8 – II.	60	60	60	60
OK 8/24	40	30	15	0
ZK 8/24	0	10	25	40

3. *táblázat*

A betonkeverékek főbb tervezési jellemzői

Keverék csoport jele	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Nyomószilárdsági osztály	C 25	C 25	C 25	C 16	C 16	C 16
Konzisztencia	FN	KK	K	FN	KK	K
Vízcementtényező	0,50	0,50	0,50	0,63	0,65	0,67
450 pc cement, kg/m³	260	300	360	205	230	260
Víz, kg/m³	130	150	180	130	150	175
Adalékanyag, kg/m³	1975	1975	1865	1975	1975	1960
Friss beton testsűrűsége, kg/m³	2365	2425	2405	2310	2355	2395
Péptartalom, liter/m³	213,9	246,8	296,1	196,1	224,1	258,9
Hozzávetőleges levegőtartalom, liter/m³	38	5	0	56	28	0
péptelítettség	hiányos	telített	túl-telített	hiányos	hiányos	telített

4. *táblázat*

Beton keverékek összetétele, kg/m³

Keverék jele	11.	12.	13.	14.	21.	22.	23.	24.	31.	32.	33.	34.
450 pc	260	260	260	260	300	300	300	300	360	360	360	360
Víz	130	130	130	130	150	150	150	150	180	180	180	180
EHK 8–II.	1185	1185	1185	1185	1185	1185	1185	1185	1119	1119	1119	1119
OK 8/24	790	592	296	–	790	592	296	–	746	560	280	–
ZK 8/24	–	198	494	790	–	198	494	790	–	186	466	746

Keverék jele	41.	42.	43.	44.	51.	52.	53.	54.	61.	62.	63.	64.
450 pc	205	205	205	205	230	230	230	230	260	260	260	260
Víz	130	130	130	130	150	150	150	150	175	175	175	175
EHK 8–II.	1185	1185	1185	1185	1185	1185	1185	1185	1176	1176	1176	1176
OK 8/24	790	592	296	–	790	592	296	–	784	588	294	–
ZK 8/24	–	198	494	790	–	198	494	790	–	196	490	784

5. táblázat

A beton roskadási mértéke, átlagos testsűrűsége, tényleges cementtartalma

Keverék jele	11.	12.	13.	14.	21.	22.	23.	24.
Roskadási mérték, cm	0,5	0,5	0,7	0,6	4,2	4,0	3,9	3,7
Konzisztencia	FN	FN	FN	FN	KK	KK	KK	KK
Testsűrűség, kg/m^3								
friss beton	2379	2388	2384	2388	2374	2368	2359	2377
28 napos beton	2338	2352	2350	2336	2336	2336	2322	2340
Cementtartalom, kg/m^3	262	263	262	263	294	293	292	294

Keverék jele	31.	32.	33.	34.	41.	42.	43.	44.
Roskadási mérték, cm	7,2	7,4	6,9	6,8	0,7	0,9	0,9	0,5
Konzisztencia	K	K	K	K	FN	FN	FN	FN
Testsűrűség, kg/m^3								
friss beton	2340	2358	2353	2362	2368	2352	2364	2363
28 napos beton	2313	2316	2324	2320	2321	2322	2323	2330
Cementtartalom, kg/m^3	350	353	352	354	210	209	210	210

Keverék jele	51.	52.	53.	54.	61.	62.	63.	64.
Roskadási mérték, cm	4,4	3,9	4,2	3,7	8,8	8,1	8,7	8,5
Konzisztencia	KK	KK	KK	KK	K	K	K	K
Testsűrűség, kg/m^3								
friss beton	2334	2340	2349	2366	2340	2350	2349	2368
28 napos beton	2322	2332	2327	2326	2322	2330	2326	2328
Cementtartalom, kg/m^3	228	229	229	231	254	255	255	257

A beton nyomószilárdsága *6. táblázat*

N/mm²

Keverék jele	11.	12.	13.	14.	21.	22.	23.	24.
egyes	24,4 25,8 26,3	29,6 26,0 26,8	30,7 29,6 29,3	31,9 28,2 30,4	29,2 29,8 31,8	30,4 31,9 31,6	32,6 32,9 33,1	37,7 33,4 35,7
átlag	25,5	27,5	29,9	30,2	30,3	31,3	32,9	35,6

Keverék jele	31.	32.	33.	34.	41.	42.	43.	44.
egyes	31,8 32,1 34,6	33,1 32,6 35,7	36,4 35,3 34,9	38,0 35,7 34,1	21,2 22,9 21,5	21,8 22,9 23,2	25,7 22,2 24,6	24,6 22,3 25,5
átlag	32,8	33,8	35,5	35,9	21,9	22,6	24,2	24,1

Keverék jele	51.	52.	53.	54.	61.	62.	63.	64.
egyes	23,3 21,6 24,2	22,8 24,2 23,5	25,5 24,4 25,3	28,1 26,4 23,8	28,6 27,9 24,0	27,7 25,5 28,8	27,9 29,4 27,5	30,9 30,2 26,5
átlag	23,0	23,5	25,1	26,1	26,8	27,3	28,3	29,2

A beton hasító-húzószilárdsága *7. táblázat*

N/mm²

Keverék jele	11.	12.	13.	14.	21.	22.	23.	24.
egyes	2,67 2,79 2,71	2,76 2,88 2,61	2,72 3,01 2,92	2,96 3,10 2,64	3,06 2,55 2,89	2,70 2,89 3,19	2,83 3,08 2,93	3,12 3,59 3,29
átlag	2,72	2,75	2,88	2,90	2,83	2,93	2,95	3,33

Keverék jele	31.	32.	33.	34.	41.	42.	43.	44.
egyes	3,30 2,96 2,82	3,24 3,44 3,09	3,64 3,38 3,46	3,32 3,78 3,88	2,42 2,52 2,09	2,21 2,32 2,52	2,75 2,58 2,48	2,74 2,52 3,09
átlag	3,03	3,26	3,49	3,66	2,34	2,35	2,60	2,78

Keverék jele	51.	52.	53.	54.	61.	62.	63.	64.
egyes	2,56 2,45 2,97	2,70 2,75 2,98	3,05 2,79 2,95	3,32 2,90 2,73	2,93 2,61 2,70	3,05 2,89 2,93	3,07 3,28 3,23	3,32 3,16 3,39
átlag	2,66	2,81	2,93	2,98	2,75	2,96	3,19	3,29

A beton jellemző értéke és szilárdsági osztályai *8. táblázat*

Keverék jele	Nyomószilárdság				Húzószilárdság				
	k	s N/mm²	R_k N/mm²	C	k	s N/mm²	R_{tsk} N/mm²	R_{tek} N/mm²	H
11.	1,06	2,00	20,7	20	0,71	0,5	1,91	2,54	2,2
12.	1,08	2,13	22,3	20	0,71	0,5	1,94	2,59	2,2
13.	1,10	2,00	24,9	20	0,71	0,5	2,07	2,81	2,7
14.	1,10	2,19	24,7	20	0,71	0,5	2,09	2,84	2,7
21.	1,11	2,00	25,2	25	0,71	0,5	2,02	2,72	2,7
22.	1,11	2,00	26,2	25	0,72	0,5	2,11	2,87	2,7
23.	1,13	2,00	27,7	25	0,72	0,5	2,13	2,91	2,7
24.	1,15	2,54	28,9	25	0,73	0,5	2,50	3,55	3,5
31.	1,13	2,00	27,6	25	0,72	0,5	2,21	3,04	3,0
32.	1,14	2,00	28,6	25	0,73	0,5	2,43	3,43	3,0
33.	1,15	2,00	30,3	30	0,73	0,5	2,66	3,84	3,5
34.	1,16	2,31	29,8	25	0,74	0,5	2,82	4,13	4,0
41.	1,02	2,00	17,2	16	0,70	0,5	1,54	1,94	1,7
42.	1,03	2,00	17,9	16	0,70	0,5	1,55	1,95	1,7
43.	1,05	2,07	19,2	16	0,71	0,5	1,79	2,34	2,2
44.	1,04	2,00	19,4	16	0,71	0,5	1,97	2,64	2,2
51.	1,03	2,00	18,3	16	0,71	0,5	1,85	2,44	2,2
52.	1,04	2,00	18,8	16	0,71	0,5	2,00	2,69	2,2
53.	1,05	2,00	20,3	20	0,72	0,5	2,11	2,87	2,7
54.	1,06	2,54	20,0	20	0,72	0,5	2,16	2,96	2,7
61.	1,07	2,72	20,2	20	0,71	0,5	1,93	2,57	2,2
62.	1,08	2,00	22,4	20	0,72	0,5	2,14	2,92	2,7
63.	1,09	2,00	23,3	20	0,72	0,5	2,37	3,32	3,0
64.	1,09	2,60	22,7	20	0,73	0,5	2,46	3,48	3,0

Szilárdsági arány a zúzottkavics tömeg %-ában *9. táblázat*

Keverék jele	p_z zúzott-kavics tömeg %	Nyomószilárdság		Húzószilárdság		
		r_m átlag	r_k jellemző érték	r_{ts} hasító átlag	r_{tsk} hasító jellemző érték	r_{tek} hajlító jellemző érték
11.	0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12.	10	1,08	1,08	1,01	1,02	1,02
13.	25	1,17	1,20	1,06	1,08	1,11
14.	40	1,18	1,19	1,07	1,09	1,12
21.	0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
22.	10	1,03	1,04	1,04	1,04	1,06
23.	25	1,09	1,10	1,04	1,05	1,07
24.	40	1,17	1,15	1,18	1,24	1,31
31.	0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
32.	10	1,03	1,04	1,08	1,10	1,13
33.	25	1,08	1,10	1,15	1,20	1,26
34.	40	1,09	1,08	1,21	1,28	1,36
41.	0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
42.	10	1,03	1,04	1,00	1,01	1,01
43.	25	1,11	1,12	1,11	1,16	1,21
44.	40	1,10	1,13	1,19	1,28	1,36
51.	0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
52.	10	1,02	1,03	1,06	1,08	1,10
53.	25	1,09	1,11	1,10	1,14	1,18
54.	40	1,13	1,09	1,12	1,17	1,21
61.	0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
62.	10	1,02	1,11	1,08	1,11	1,14
63.	25	1,06	1,15	1,16	1,23	1,29
64.	40	1,09	1,12	1,20	1,27	1,35

A betonkeverékeket laboratóriumi ZZ 75 Zyklos típusú együttfutó kényszerkeverőgépben egy percig tartó száraz és három percig tartó vizes keveréssel állítottuk elő. Keverékként 6 db ∅ 150×300 mm méretű próbahengert készítettünk. A próbahengereket 2800/perc rezgésszámú RZ-4 típusú Épgép gyártmányú rázóasztalon tömörítettük, majd gondosan lesimítottuk és üveglap alatt szilárdítottuk.

A friss beton konzisztenciáját kifejező roskadási mértéket az MSZ 4714/3–78 szabvány, a testsűrűséget az MSZ 4715/2–72 szabvány szerint vizsgáltuk. A roskadási mértéket, a friss beton és a megszilárdult beton átlagos testsűrűségét, valamint a beton tényleges cementtartalmát az *5. táblázatban* tüntettük fel.

A próbahengereket két héten át 20—22 °C hőmérsékletű és 95% feletti relatív légnedvesség tartalmú klímateremben, majd 28 napos korig ugyancsak 20—22 °C hőmérsékleten a laboratóriumban szobalevegőn tároltuk.

A próbahengerek szilárdság vizsgálatát 28 napos korban az MSZ 4715/4—72 szabvány szerint végeztük el. Három próbahengert nyomószilárdság, három próbahengert hasító-húzószilárdság vizsgálatnak vetettünk alá. A nyomószilárdság vizsgálatra szánt pró-

bahengerek felső véglapját simára gipszeltük. A nyomószilárdság vizsgálati eredmények a *6. táblázatban*, a hasító-húzószilárdság vizsgálati eredmények a *7. táblázatban* találhatók.

A kísérleti eredmények értékelése

A kísérleti eredmények értékelése során a *6.* és *7. táblázatbeli* szilárdság mérési adatok felhasználásával kiszámítottuk a különböző összetételű betonkeverékek átlagos R_m nyomó-, illerve R_{tsm} hasító-húzószilárdsághoz tartozó, az MSZ 4719—82 szabványnak megfelelő R_k nyomószilárdsági és R_{tsk} hasító-húzószilárdsági jellemző értékét:

$$\left.\begin{matrix} \mathrm{R_k} \\ \mathrm{R_{tsk}} \end{matrix}\right\} = \left\{\begin{matrix} \mathrm{R_m} \\ \mathrm{R_{tsm}} \end{matrix}\right. - \mathrm{k.t.s}$$

A számítást az MSZ 4720/2—80 szabvány szerint végeztük és eredményét a *8. táblázatban* foglaltuk össze, amelyben *k* a szilárdsági eloszlástól függő

tényező $\{k = f(R_m$, illetve $R_{tsm})\}$, t a próbatestek számától függő tényező (értéke jelen esetben 2,28), s a szilárdsági értékek szórása (a szilárdsági terjedelem 1,69 része azzal a feltétellel, hogy a szórás számításba vehető legkisebb értéke nyomószilárdság esetén 2,0 N/mm², hasító-húzószilárdság esetén 0,5 N/mm²).

Az R_{tek} hajlító-húzószilárdsági jellemző értékét az

$$R_{tek} = 1{,}13 \cdot R_{tsk}^{5/4}$$

összefüggésből számítottuk ki [2], és ugyancsak a *8. táblázatban* tüntettük fel. A *8. táblázatban* található a betonkeverékek MSZ 4719–82 szabvány szerinti tényleges *C* nyomószilárdsági és *H* hajlító-húzószilárdsági osztálya is.

A *9. táblázatban* megadtuk, hogy a zúzottkavcsi mennyiségének változása betonkeverékenként milyen hatással van az átlag szilárdságra és a jellemző értékre. E hatást valamely betonkeverékre nézve annak, valamint a zúzottkavcicsot nem tartalmazó betonkeveréknek átlag szilárdságából, illetve jellemző értékéből

képezett viszonyszámokkal fejeztük ki. Értékük 1,00–1,36 közötti szám.

Ezt követően azt vizsgáltuk, hogy e viszonyszámok milyen törvényszerűség szerint változnak a zúzottkavics tartalom és a szilárdság függvényében. Az azonos cementtartalmú betonkeverékek csoportján belül a szilárdsági jellemző érték viszonyszámának változását a p_z zúzottkavics tartalom függvényében

$$\left.\begin{array}{l} r_k \\ r_{tsk} \end{array}\right\} = a \cdot p_z^2 + b \cdot p_P + 1$$

alakban kerestük. A legkisebb hibanégyzet összegek módszerével kiszámított *a* és *b* függvényegyütthatók értékét és a regressziós összefüggések korrelációs jellemzőit, nevezetesen az *I* korrelációs indexet, az *S* standard hibát és a *H* relatív hibát, továbbá a $p_z = 0$ tömeg % zúzottkavics tartalmú beton R_{ko}, illetve R_{tsko} szilárdsági jellemző értékét a *10. táblázatban* tüntettük fel.

A *10. táblázatbeli* függvény-együtthatók ugyancsak a legkisebb hibanégyzet összegek módszere segítségével kifejezhetők az R_{ko}, illetve az R_{tsko} szilárdsági jellemző érték függvényében és ezáltal a szilárdsági jellemző értéke viszonyszámának kifejezései általánosabb érvényű formát is ölthetnek:

$$\begin{aligned} r_k &= (+0{,}000004379 \cdot R_{ko} - 0{,}0002064) \cdot p_z^2 + \\ &+ (-0{,}000220912 \cdot R_{ko} + 0{,}0124648) \cdot p_z + 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_{tsko} &= (-0{,}000177674 \cdot R_{tsko} + 0{,}0003255) \cdot p_z^2 + \\ &+ (+0{,}006910971 \cdot R_{tsko} - 0{,}0071050) \cdot p_z + 1 \end{aligned}$$

E formulák paraméterei az MSZ 4719–82 szerinti szabványos nyomószilárdsági osztályok 16, 20, 25 és 30 N/mm^2 minősítő értékeire, valamint ezek átlagára (23 N/mm^2), továbbá az irodalom szerint [2], az ezekhez bizonyos valószínűséggel rendelhető 1,7, 2,0, 2,25, és 2,5 N/mm^2 hasító-húzószilárdsági minősítő értékeire, valamint ezek átlagára (2,1 N/mm^2) a *11. táblázatban* feltüntetett értékeket veszik fel. A viszonyszámokat kiszámítottuk a szilárdsági osztály és a zúzottkavics tartalom függvényében és a

12. táblázatban szerepeltetjük. Ebből kitűnik, hogy a nyomószilárdságnak a $p_z = 35$ tömeg % zúzottkavics tartalom környezetében maximuma van, amelynek helyét és nagyságát külön is megadtuk. Látszik továbbá, hogy a viszonyszámok változása a szilárdsági osztályok függvényében lényegében kisebb, mint a regressziós közelítés *10. táblázatbeli* S standard hibája. Ezért e változás elha nyagolható, és a szilárdsági osztályonkénti viszonyszám függvény jól kifejezhető az átlagos szilárdsági minősítő értékhez tartozó együtthatókkal:

$$r_C = -0{,}000106 \cdot p_z^2 + 0{,}0074 \cdot p_z + 1$$
$$r_{tsH} = -0{,}000048 \cdot p_z^2 + 0{,}0074 \cdot p_z + 1$$

Az általános érvényű összefüggések *12. táblázatbeli* viszonyszám értékei szerint mintegy $p_z = 35$ tömeg % zúzottkavics adagolás esetén a beton nyomószilárd-

ság jellemző értéke várhatóan 13%-kal, a hasító-húzószilárdságé 20%-kal nagyobb, mint zúzottkavics tartalom nélkül. A kettőt egybevetve mintegy 16%-os szilárdsági jellemző érték növekedésről lehet beszélni. Meg kell jegyezni, hogy a 35 tömeg % zúzottkavics tartalmú adalékanyag alkalmazásakor még nem romlik a beton bedolgozhatósága és a konzisztencia sem változik számottevően.

A zúzottkavics adagolás gazdaságossága

A gazdasági értékelésnél abból a kísérleti eredményből indulhatunk ki, hogy 35 tömeg % zúzottkavics adagolása 13% nyomószilárdsági jellemző érték növekedést eredményez. Kérdés, hogy ezt a nyomószilárdság növekedést zúzottkavicsot nem tartalmazó osztályozott homokos kavics esetén mekkora cement többletadagolással lehet biztosítani, azaz a zúzottkavics adagolás által mennyi cementet lehet megtakarítani.

Az MI-04.19-85 műszaki irányelv a beton cementtartalmát a beton nyomószilárdsági osztálya szerint szabályozza, a 450 pc minőségű cementtel készülő receptbetonok cementtartalmát $d_{max} = 24$ mm esetére a *13. táblázatban* foglaltuk össze az adalékanyag

osztálya, a beton konzisztenciája és nyomószilárdsági jellemző értéke függvényében. A *13. táblázat* adatai alapján

$$c = a \cdot R_k + b$$

alakú lineáris összefüggést írtunk fel a beton R_k nyomószilárdsági jellemző értéke és a c cementtartalom között minden adalékanyag osztály és beton konzisztencia kombinációra. A legkisebb hibanégyzet összegek módszere segítségével kiszámított a és b együtthatók értékeit a *14. táblázatban* adtuk meg. E függvény paraméterek felhasználásával kiszámítottuk és a *14. táblázatban* szerepeltetjük az R_k nyomószilárdsági jellemző értékekhez tartozó c cementtartalmakat, valamint a 13%-os nyomószilárdsági jellemző érték növekménynek megfelelő $\Delta c = 13 \cdot a \cdot R_k$ többlet cementtartalmat.

A *14. táblázat* adatainak átlagát véve megállapítható, hogy a 35% zúzottkavics adagolás átlagosan mintegy 27 kg/m³ 450 pc minőségű többlet cement adagolással egyenértékű, azaz általa mintegy 8,5%-os 450 pc cement megtakarítás érhető el. A 450 pc cement anyagárát 1430,— Ft/tonnának véve adódik, hogy a 27 kg megtakarított cement ára 38,5 Ft. Ezt a 690 kg/beton m³ = 0,46 m³/beton m³ zúzottkavics mennyiségre vetítve adódik, hogy a betonadalékanyagként felhasználásra kerülő zúzottkavics értéke a cement egyenérték alapján számolva átlagban 83,9 Ft/m³-rel nagyobb, mint a csak osztályozott kavicsé. Az érték különbség a mai termékárakban korántsem érvényesül, holott a beton nyomószilárdsági egyenérték alapján számolva az érték különbség ennek többszöröse is lehet. Így például ha a *C 16* és *C 20* nyomószilárdsági osztályú beton anyagár különbsége 500 Ft/beton m³, akkor ebből a 13%-os jellemző érték növekményre 260 Ft/beton m³ anyagár különbség adódik. A nyomószilárdsági egyenérték alapján tehát 1 m³ zúzottkavics mintegy 565 Ft beton anyag érték növekedést hordoz magában. Ez durván hat és félszerese a cement egyenérték alapján számítottnak, ami az esetenként reális számítási alap kiválasztásának fontosságára utal.

10. táblázat

A keverékcsoportonkénti viszonyszám-függvények jellemzői

Keverék csoport jele	R_{ko}, R_{tsko} N/mm²	a	b	I	S tömeg %	H %
Nyomószilárdság jellemző érték viszonyszáma $r_k = a \cdot p_z^2 + b \cdot p_z + 1$						
11 – 14.	20,7	−0,000167988	+0,0115888	0,985	0,014	1,27
21 – 24.	25,2	−0,000012922	+0,0042761	1,000	0,000	0,00
21 – 34.	27,6	−0,000103377	+0,0062085	0,983	0,007	0,67
41 – 44.	17,2	−0,000068135	+0,0060617	0,991	0,007	0,66
51 – 54.	18,3	−0,000090162	+0,0059868	0,941	0,015	1,42
61 – 64.	20,2	−0,000229956	+0,0121248	0,992	0,007	0,65
Hasító-húzószilárdsági jellemző érték viszonyszáma $r_{tsk} = a \cdot p_z^2 + b \cdot p_z + 1$						
11 – 14.	1,91	−0,000031131	+0,0035742	0,983	0,007	0,68
21 – 24.	2,02	+0,000176799	−0,0012922	0,972	0,022	2,01
31 – 34.	2,21	−0,000081645	+0,0102291	0,999	0,005	0,44
41 – 44.	1,54	+0,000111894	+0,0027004	0,987	0,019	1,68
51 – 54.	1,85	−0,000105727	+0,0084405	0,997	0,005	0,46
61 – 64.	1,93	−0,000153598	+0,0129178	1,000	0,000	0,00

11. táblázat

Szilárdsági osztályonkénti viszonyszám-függvények paraméterei

Szilárdsági osztály	a	b
Nyomószilárdsági osztály viszonyszáma $r_c = a \cdot p_z^2 + b \cdot p_z + 1$		
C 16	−0,000136336	+0,0089302
C 20	−0,000118820	+0,0080466
átlagos, 23	−0,000105683	+0,0073838
C 25	−0,000096925	+0,0069420
C 30	−0,000075030	+0,0058374
Hasító-húzószilárdsági osztály viszonyszáma $r_{tsH} = a \cdot p_z^2 + b \cdot p_z + 1$		
H_{ts} 1,7	+0,000023454	+0,0046437
H_{ts} 2,0	−0,000029848	+0,0067169
átlagos 2,1	−0,000047615	+0,0074080
H_{ts} 2,25	−0,000074266	+0,0084447
H_{ts} 2,5	−0,000118685	+0,0101724

12. táblázat

Szilárdsági osztályonkénti viszonyszám értékek

p_z	5	10	15	20	25	30	35	40	Maximum	
									r_{Cmax}	$p_{z\,(max)}$
C Nyomósziláreségi osztály viszonyszám értéke r_C										
16	1,041	1,076	1,103	1,124	1,138	1,145	1,146	1,139	1,1462	32,75
20	1,037	1,069	1,094	1,113	1,127	1,134	1,136	1,132	1,1362	33,86
átlagos 23	1,034	1,063	1,087	1,105	1,119	1,126	1,129	1,126	1,1290	34,93
25	1,032	1,060	1,082	1,100	1,113	1,121	1,124	1,123	1,1243	35,81
30	1,027	1,051	1,071	1,087	1,099	1,108	1,112	1,113	1,1135	38,90
H_{ts} Hasító-húzószilárdsági osztály viszonyszám értéke r_{tsH}										
1,7	1,024	1,049	1,075	1,102	1,131	1,160	1,191	1,223		
2,0	1,033	1,064	1,094	1,122	1,149	1,175	1,199	1,221		
átlagos 2,1	1,036	1,069	1,100	1,129	1,155	1,179	1,201	1,220		
2,25	1,040	1,077	1,110	1,139	1,165	1,187	1,205	1,219		
2,5	1,048	1,090	1,126	1,156	1,180	1,198	1,211	1,217		

13. táblázat

Beton és vasbeton szerkezetekhez alkalmazható receptbeton cementtartalma d_{max} = 24 mm és 450 pc esetén (MI – 04.19 – – 85 alapján)

Adalékanyag osztály Beton konzisztencia	I. FN	I. KK	I. K	II. FN	II. KK	II. K
Beton nyomószilárdsági jell. érték, N/mm²	Cementtartalom, kg/m³					
16	202	228	260	230	262	305
20	230	260	295	265	300	350
25	260	300	360	300	345	410

14. táblázat

A 13%-os nyomószilárdsági jellemző érték növekedésének megfelelő cement egyenérték számítása d_{max} = 24 mm és 450 pc esetén

Adalékanyag osztály		I.	I.	I.	II.	II.	II.	Átlag
Beton konzisztencia		FN	KK	K	FN	KK	K	
Függvény paraméter,	a	6,43	8,0	11,19	7,75	9,21	11,68	
	b	100,0	100,0	77,5	107,5	115,0	117,5	
Beton nyomószilárdsági jellemző érték, R_k N/mm²		A jellemző értékhez tartozó c cementtartalom és a 13%-os jellemző érték növekménynek megfelelő Δc többlet cement tartalom, kg/m³						
16	c	202,8	228,0	256,5	231,4	262,4	304,4	247,6
	Δc	13,4	16,6	23,3	16,1	19,2	24,3	18,8
20	c	228,5	260,0	301,3	262,4	299,3	351,1	283,8
	Δc	16,7	20,8	29,1	20,1	24,0	30,4	23,5
átlagos 23	c	247,8	284,0	334,8	285,7	326,9	386,2	310,9
	Δc	19,2	23,9	33,4	23,2	27,6	34,9	27,0
25	c	260,7	300,0	357,2	301,2	345,3	409,5	329,0
	Δc	20,9	26,0	36,4	25,2	29,9	38,0	29,4
30	c	292,8	340,0	413,2	339,9	391,4	467,9	374,2
	Δc	25,1	31,2	43,6	30,2	35,9	45,6	35,3
Átlagos cement egyenérték %		7,75	8,42	9,98	8,12	8,44	9,04	8,63

A zúzottkavics adalékanyag pépigénye

A zúzottkavics betonok szilárdsági tartalékaik folytán cementtakarékosak, de feltétlenül indokolt e kijelentés jogosságát a pépigény oldaláról is megvizsgálni. A beton cementtartalma ugyanis akkor optimális, ha a cementet hordozó cementpép maradéktalanul bevonja az adalékanyag szemek felületét és éppen kitölti a betömörített adalékanyag vázszerkezet hézagait. Az ilyen beton telített állapotú, az ennél kevesebb cementpépet tartalmazó beton megfelelő tömörítés mellett is levegőt tartalmaz és telítetlen, míg a többlet cementpéppel készített beton pépdús és túltelített. A telített beton előállításához szükséges cementpép mennyisége az adalékanyag pépigényével fejezhető ki [3].

A homokos kavics adalékanyag pépigényének számítási képletét *dr. Ujhelyi János* az *Építéstudományi Intézet* tud. tanácsadója dolgozta ki [3] és ebben a formában szerepel az MI-04.19-85 műszaki irányelvben is:

$$V_{po} = 350 - 22 \lg (U_{70} - 0{,}5) \cdot \frac{64}{16 + (m-7)^2} \; [\text{liter/m}^3]$$

ahol U_{70} az adalékanyag 70 és 10 tömeg %-os áthulláshoz tartozó szemnagyságai hányadosából számított egyenlőtlenségi tényező és *m* a finomsági modulus. Esetünkben az *1. táblázat* utolsó oszlopában szereplő szemmegoszlású kísérleti adalékanyag egyenlőtlenségi tényezője $U_{70} = 10{,}08/0{,}34 = 29{,}65$, és a zúzott szemeket nem tartalmazó homokos kavics pépigénye $V_{po} = 226{,}7$ liter/m³.

A zúzottkavics keverékek pépigénye a homokos kavicsénál minden bizonnyal nagyobb, mert a zúzott szemek a legömbölyödöttekhez képest egyrészt azonos szemalak esetén is általában nagyobb térfogati fajlagos felülettel rendelkeznek, másrészt szemalakjuk a

térfogati fajlagos felületet növelve és a bedolgozást nehezítve lemezesebb lehet, harmadrészt ugyancsak a bedolgozást nehezítve a zúzott szemek érdesek, sarkosak és élesek. E hatások mértéke további vizsgálódás tárgyát kell képezze, a *3. táblázat* alapján mégis arra következtethetünk, hogy betonkeverékeink nem voltak túltelítettek, a zúzottkavics szilárdságfokozó hatása nem párosult cement túladagolással, hogy a zúzottkavics betonok, ha cementtöbblettel készülnek, akkor annak a nagyobb pépigény ellenére elsősorban bedolgozhatósági és nem szilárdságnövelési okai vannak.

IRODALOM

[1] *Kausay T.:* A zúzottkőbetonok és a különleges betonok tulajdonságai. Szabványosítás. 35. évf. 1983. 7. szám. 193 – 198. p. és 8. szám. 236 – 240. p.

[2] *Szalai K.* (szerkesztő): A beton minőségellenőrzése. MSZH Szabványosítási Szakkönyvtár. 26. szám. Szabványkiadó. Budapest, 1982.

[3] *Ujhelyi J.:* Betontechnológia I. Vízépítési segédletek. VIZDOK. Budapest, 1985. Főiskolai jegyzet.

Kausay Tibor: **Zúzottkavics adalékanyagú betonok szilárdsága**

A betonadalékanyag optimális zúzottkavics tartalma mintegy 35 tömeg %. Az ilyen összetételű homokos kavics alkalmazásakor még nem romlik a beton bedolgozhatósága, alig növekszik a pép- és cementigény, számottevően nem változik a konzisztencia, ugyanakkor javulnak a beton szilárdsági tulajdonságai. A 35 tömeg % zúzottkavics adagolás a nyomószilárdság növekedés szempontjából 27 kg/m³ pc minőségű cement többletadagolással egyenértékű, és 13 % nyomószilárdság és 20 % hasító-húzószilárdság növekedést eredményez. A zúzottkavics magasabb előállítási költségei betonszilárdság fokozó hatásuk révén térülhetnek meg.